



TESIS - RC142501

**KAJIAN PERILAKU GESER KOLOM BETON BERTULANG MUTU TINGGI  
MENGUNAKAN METODE *FINITE ELEMENT***

FAHRUDIN SAFI  
NRP 3115 202 007

Dosen Pembimbing  
Data Iranata, ST., MT., Ph.D.  
Harun Alrasyid, ST., MT., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER  
JURUSAN TEKNIK SIPIL  
PROGRAM PASCASARJANA  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017



TESIS - RC142501

**KAJIAN PERILAKU GESER KOLOM BETON BERTULANG MUTU TINGGI  
MENGUNAKAN METODE *FINITE ELEMENT***

FAHRUDIN SAFI  
NRP 3115 202 007

Dosen Pembimbing  
Data Iranata, ST., MT., Ph.D.  
Harun Alrasyid, ST., MT., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER  
JURUSAN TEKNIK SIPIL  
PROGRAM PASCASARJANA  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017

## LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T.)

di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:  
**Fahrudin Safi**  
NRP. 3115 202 007

Tanggal Ujian : 14 Juni 2017  
Periode Wisuda : September 2017

Disetujui oleh:

  
1. **Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.** (Dosen Pembimbing I)  
NIP. 19800430 2005 011 002

  
2. **Harun Alrasyid, S.T., M.T., Ph.D.** (Dosen Pembimbing II)  
NIP. 19830808 2008 121 005

  
3. **Dr. techn. Pujo Aji, S.T., M.T.** (Dosen Penguji I)  
NIP. 19730208 1998 021 001

  
4. **Dr. Ir. Djoko Irawan, M.S.** (Dosen Penguji II)  
NIP. 19590213 1987 011 001



Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

  
**Ir. Purwanita Seti'anti, M.Sc., Ph.D.**  
NIP. 19590427 1985 032 001

# **KAJIAN PERILAKU GESER KOLOM BETON BERTULANG MUTU TINGGI MENGGUNAKAN METODE *FINITE ELEMENT***

Nama : Fahrudin Safi  
NRP : 3115 202 007  
Pembimbing : 1. Data Iranata, ST., MT., Ph.D.  
2. Harun Alrasyid, ST., MT., Ph.D.

## **ABSTRAK**

Kemajuan teknologi material memberikan dampak yang sangat signifikan dalam pengembangan kekuatan pada struktur, diantaranya yaitu beton mutu tinggi dan baja tulangan mutu tinggi yang mana dapat membantu dalam mereduksi dimensi pada elemen struktur. Kolom merupakan salah satu elemen struktur yang sangat berpengaruh pada perilaku struktur.

ACI 318-14 membatasi penggunaan material mutu tinggi dalam perencanaan geser, dimana untuk kuat tekan beton dibatasi 70 MPa dan kuat leleh tulangan transversal dibatasi 420 MPa. Oleh karena itu, tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengkaji perilaku geser yang terjadi pada kolom beton bertulang mutu tinggi dengan metode *finite element*.

Terdapat sembilan spesimen kolom beton bertulang mutu tinggi dengan dimensi 600x600x1800 mm yang dimodelkan menggunakan program VecTor2 dengan kombinasi beban monotonik dan tekan aksial konstan. Spesifikasi kuat tekan beton adalah 70 MPa, tulangan longitudinal mutu tinggi (SD685), tulangan transversal mutu tinggi (SD785), dengan spesifikasi kuat leleh 685 MPa dan 785 MPa. Input parameter yang digunakan dalam pemodelan adalah variasi tekan aksial dan jumlah tulangan geser. Hasil yang diperoleh dari studi ini menunjukkan bahwa semakin besar rasio beban aksial yang diberikan maka kekuatan geser kolom akan semakin bertambah, namun tingkat penambahannya tidak sebesar nilai beban aksial yang diberikan.

Kata Kunci : *kolom beton bertulang, beton mutu tinggi, baja tulangan mutu tinggi, metode finite element, VecTor2*

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

# **PREDICTING SHEAR CRITICAL BEHAVIOR OF HIGH-STRENGTH REINFORCED CONCRETE COLUMNS USING FINITE ELEMENT METHODS**

Name : Fahrudin Safi  
Student ID : 3115 202 007  
Advisor : 1. Data Iranata, ST., MT., Ph.D.  
2. Harun Alrasyid, ST., MT., Ph.D.

## **ABSTRACT**

Advancement in material technology has led to the development of high-strength materials of the structures, such as high-strength concrete and high-strength reinforcement which give significant benefit by reducing the dimension of structural element. Column is one of structural elements that was influential on the behavior of the structure.

ACI 318-14 limits the use of high-strength material in shear design, where the limit of concrete compressive strength is 70 MPa and yield strength of shear reinforcement is 420 MPa. Therefore, the major objective of this research was to identify the shear critical behavior of high-strength reinforced concrete columns using finite element methods.

Nine specimens of high-strength reinforced concrete columns with dimensions 600x600x1800 mm that modeled using VecTor2 under the combination of monotonic and axial compressive load. The specified concrete compressive strength was 70 MPa, high strength longitudinal (SD685) and transverse (SD785) having specified yield strength 685 MPa and 785 MPa were used. The input parameters used in modeling is a variation of axial compression and the amount of shear reinforcement. The results obtained from this study show that as the axial compression load increase the rate of increasing shear strength at diagonal cracking tended to decrease. It is not as large as the axial load value given.

Key Words : *reinforced concrete column, high-strength concrete, high-strength reinforcement, finite element methods, VecTor2*

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbilalamiin, Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, karena atas berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Thesis dengan judul “Kajian Perilaku Geser Kolom Beton Bertulang Mutu Tinggi Menggunakan Metode *Finite Element*”.

Penulis menyadari bahwa keberhasilan dalam menyelesaikan Thesis ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan dan dorongan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, penulis mengucapkan banyak terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Allah SWT, yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya.
2. Orang Tua dan Keluarga yang selalu memberikan doa, dukungan dalam memperlancar kegiatan belajar sehingga Thesis ini dapat diselesaikan.
3. Bapak Harun Alrasyid, S.T., M.T., Ph.D., dan Bapak Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan dan arahan dalam penyusunan Thesis ini.
4. Bapak Prof., Ir., Priyo Suprobo, M.S., Ph.D., selaku dosen wali yang selalu memberikan arahan dalam masa perkuliahan.
5. Seluruh dosen pengajar beserta staff karyawan di Pascasarjana Teknik Sipil Struktur ITS, terima kasih atas ilmu-ilmu yang telah diberikan.
6. Nilawati Pangulu yang telah memberikan doa, semangat, dan motivasi sehingga Thesis ini dapat diselesaikan.
7. Abdul Rochim, Julio Cezar, Teddy Yustiyono, Wilson Rafael, Cintantya Budi Casita, Evrianti Syntia, Indra Komara, yang telah menjadi partner dalam pengerjaan Thesis ini.
8. Teman-teman Pascasarjana Teknik Sipil Struktur ITS 2015 yang turut membantu dan memberikan semangat kepada penulis.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang selalu memberi dukungan untuk penulis selama perkuliahan dan pengerjaan Thesis ini, semoga jasa anda dibalas kebaikan oleh-Nya.

Penulis menyadari bahwa Thesis ini masih mempunyai banyak kekurangan sehingga masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu penulis mengharapkan



kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak dalam perbaikan Thesis ini. Semoga Thesis ini bermanfaat dan dapat menambah pengetahuan bagi para pembaca.

Surabaya, Mei 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xv</b>
<b>BAB I     PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1.     Latar Belakang.....	1
1.2.     Permasalahan.....	3
1.3.     Batasan Masalah.....	4
1.4.     Tujuan .....	4
1.5.     Manfaat .....	5
<b>BAB II    TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>7</b>
2.1.     Pendahuluan.....	7
2.2.     Bahan Mutu Tinggi.....	7
2.2.1    Beton Mutu Tinggi.....	7
2.2.2    Baja Tulangan Mutu Tinggi.....	8
2.3.     Eksperimental Program Sebelumnya .....	11
2.4.     Program Finite Element .....	21
2.4.1.   VecTor2.....	22
2.4.2.   Model Material Pada VecTor2 .....	25
2.4.3.   Batasan Program VecTor2 .....	27
<b>BAB III   METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>29</b>
3.1.     Umum.....	29

3.2.	Persiapan Data.....	32
3.3.	Tinjauan Pustaka .....	32
3.4.	Preliminary Desain Model Spesimen Kolom.....	32
3.5.	Pemodelan Kolom Beton Bertulang Mutu Tinggi dengan Program VecTor2.....	35
3.6.	Analisa Hasil Pemodelan.....	42
3.7.	Validasi Hasil.....	43
3.8.	Kesimpulan.....	46
<b>BAB IV</b>	<b>ANALISA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>47</b>
4.1.	Umum.....	47
4.2.	Kurva Gaya – Perpindahan .....	47
4.2.1.	0.1 Rasio Beban Aksial Kolom.....	47
4.2.1.1.	Spesimen Kolom A-3.1.....	47
4.2.1.2.	Spesimen Kolom A-6.....	48
4.2.2.	0.2 Rasio Beban Aksial Kolom.....	49
4.2.2.1.	Spesimen Kolom B-3.1.....	49
4.2.2.2.	Spesimen Kolom B-5.....	50
4.2.2.3.	Spesimen Kolom B-6.....	51
4.2.3.	0.3 Rasio Beban Aksial Kolom.....	52
4.2.3.1.	Spesimen Kolom C-5.....	52
4.2.3.2.	Spesimen Kolom C-6.....	53
4.2.4.	0.4 Rasio Beban Aksial Kolom.....	54
4.2.4.1.	Spesimen Kolom D-5.....	54
4.2.4.2.	Spesimen Kolom D-6.....	55
4.3.	Pola Retak Kolom.....	56
4.4.	Perbandingan Hasil Eksperimental dengan VecTor2.....	59
4.5.	Tegangan yang Terjadi Pada Baja Tulangan.....	61
4.5.1	Tegangan Pada Tulangan Longitudinal.....	61
4.5.2	Tegangan Pada Tulangan Transversal.....	70

4.6.	Tegangan yang Terjadi Pada Beton.....	71
------	---------------------------------------	----

<b>BAB V</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>73</b>
--------------	-----------------------------------	-----------

5.1.	Kesimpulan.....	73
------	-----------------	----

5.2.	Saran.....	74
------	------------	----

<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>75</b>
----------------------------	-----------

<b>BIODATA PENULIS</b>	
------------------------	--

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat Tarik Tulangan USD685, USD785 dari Jepang dan SD685, SD785 dari Taiwan.....	9
Tabel 2.2	Sifat Tulangan Tarik kelas 80, kelas 100 dan kelas 120 .....	11
Tabel 2.3	Spesimen kolom, parameter dan beban yang diterapkan (Aoyama 2001).....	13
Tabel 2.4	Spesimen kolom, parameter dan beban yang diterapkan (Maruta 2008).....	14
Tabel 2.5	Kontribusi kuat geser oleh beton dan baja pada kondisi retak diagonal.....	16
Tabel 2.6	Perbandingan hasil eksperimen dan analitis (Mostafaei, Vecchio, and Kabeyasawa 2008).....	17
Tabel 2.7	Rekapitulasi hasil eksperimen (Jin et al, 2014).....	19
Tabel 2.8	Pengaplikasian beban kolom pada retak diagonal dan kondisi ultimate (Alrasyid 2015).....	21
Tabel 3.1	Desain Spesimen (Alrasyid 2015).....	33
Tabel 3.2	Hasil Validasi Eksperimental dan VecTor2 .....	45
Tabel 4.1	Perbandingan Hasil Eksperimental dan VecTor2.....	60
Tabel 4.2	Tegangan Pada Tulangan dan Beton Saat Beban Puncak.....	72

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi SD685.....	10
Gambar 2.2	Tulangan Transversal Mutu Tinggi SD785.....	10
Gambar 2.3	(a) Ukuran eksperimen kolom; (b) Potongan Kolom (Aoyama 2001).....	12
Gambar 2.4	(a) Ukuran specimen kolom; (b) Potongan kolom (Maruta 2008)...	13
Gambar 2.5	Desain Spesimen: (a) spesimen A-1,A-2,B-1,B-2,C-1,C-2,D-1,D-2; (b) specimen A3,A-4,B-3,B-4,C-3,C-4,D-3,D-4. (Ou and Kurniawan 2015b).....	15
Gambar 2.6	Pola retak dan model kegagalan kolom (Mostafaei, Vecchio, and Kabeyasawa 2008). ....	17
Gambar 2.7	Detailing Spesimen, satuan dalam mm (Jin et al., 2014). ....	19
Gambar 2.8	Desain Spesimen : (a) spesimen A-3.1, B-3.1; (b) spesimen B-5, C-5, D-5; (c) spesimen A-6, C-6, D-6 (Alrasyid 2015) .....	20
Gambar 2.9	Membran elemen beton bertulang yang diberikan tegangan bidang.....	23
Gambar 2.10	Regangan rata-rata pada beton dan tulangan.....	24
Gambar 2.11	Bidang Geser Elemen Beton Bertulang.....	24
Gambar 2.12	Hukum Konstitutif untuk beton pada arah tekan utama .....	24
Gambar 2.13	Respon Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Popovics Pada Pra- dan Pasca Puncak.....	25
Gambar 2.14	Respon Daktail Tegangan-Regangan Baja Tulangan.....	26
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	31
Gambar 3.2	Penulangan dan Potongan Kolom Seri A-3.1, B-3.1 (Alrasyid 2015).....	33
Gambar 3.3	Penulangan dan Potongan Kolom B-5, C-5, D-5 (Alrasyid 2015)...	34
Gambar 3.4	Penulangan dan Potongan Kolom A-6, B-6, C-6, D-6 (Alrasyid 2015).....	34
Gambar 3.5	Input case pada VecTor2 .....	36
Gambar 3.6	Contoh Pemilihan Model Material pada VecTor2.....	37
Gambar 3.7	Input material 1 (blok beton) pada VecTor2 .....	38
Gambar 3.8	Input material 2 (blok tulangan transversal) pada VecTor2 .....	38
Gambar 3.9	Input properti tulangan longitudinal pada VecTor2 .....	39
Gambar 3.10	Input data pada kotak dialog <i>define and mesh structure</i> VecTor2 ...	40



Gambar 3.11	Support Restrain pada Model Kolom .....	40
Gambar 3.12	Beban Displacement dan Beban Aksial Tekan.....	41
Gambar 3.13	Pola Retak pada Model Spesimen Kolom .....	42
Gambar 3.14	Detail Spesifikasi Balok Uji .....	43
Gambar 3.15	Permodelan struktur balok dalam VecTor2 .....	44
Gambar 3.16	Hubungan applied load terhadap defleksi (a) kondisi permodelan setengah bentang (b) kondisi permodelan struktur keseluruhan .....	45
Gambar 3.17	Gambar distribusi pola retak yang terjadi pada balok .....	46
Gambar 4.1	(a) Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom A-3.1 ; (b) Pola keruntuhan kolom A-3.1 pada beban puncak.....	48
Gambar 4.2	(a) Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom A-6 ; (b) Pola keruntuhan kolom A-6 pada beban puncak....	49
Gambar 4.3	Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom B-3.1 ; (b) Pola keruntuhan kolom B-3.1 pada beban puncak.....	50
Gambar 4.4	Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom B-5 ; (b) Pola keruntuhan kolom B-5 pada beban puncak.....	51
Gambar 4.5	(a) Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom B-6 ; (b) Pola keruntuhan kolom B-6 pada beban puncak ....	52
Gambar 4.6	(a) Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom C-5 ; (b) Pola keruntuhan kolom C-5 pada beban puncak ....	53
Gambar 4.7	(a) Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom C-6 ; (b) Pola keruntuhan kolom C-6 pada beban puncak ....	54
Gambar 4.8	(a) Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom D-5 ; (b) Pola keruntuhan kolom D-5 pada beban puncak....	55
Gambar 4.9	(a) Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom D-6 ; (b) Pola keruntuhan kolom D-6 pada beban puncak....	56
Gambar 4.10	(a) Pola Retak Kolom Hasil VecTor2, (b) Pola Retak Kolom Hasil Eksperimental. ....	57
Gambar 4.11	Sudut Retak Pada Kolom.....	59
Gambar 4.12	Korelasi kekuatan geser kolom Eksperimental dan VecTor2.....	60
Gambar 4.13	Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom A-3.1.....	62
Gambar 4.14	Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom A-6.....	63
Gambar 4.15	Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom B-3.1 .....	64

Gambar 4.16	Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom B-5.....	65
Gambar 4.17	Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom B-6.....	66
Gambar 4.18	Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom C-5.....	67
Gambar 4.19	Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom C-6.....	68
Gambar 4.20	Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom D-5.....	69
Gambar 4.21	Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom D-6.....	70
Gambar 4.22	Crack Spacing pada Model VecTor2 pada Beban Puncak .....	71
Gambar 4.23	Tegangan Beton pada Beban Puncak.....	72

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 1

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir, tantangan insinyur struktur untuk mendesain bangunan tinggi adalah cukup besar. Pemilihan material untuk bangunan tinggi yang tepat dapat menghasilkan bangunan yang kokoh dan ekonomis. Penggunaan sistem rangka beton bertulang memberikan beberapa keuntungan diantaranya tahan terhadap api, durability yang baik, kekauan yang besar dan menghasilkan harga bangunan dan harga pemeliharaan yang murah. Akan tetapi penggunaan beton bertulang mutu normal pada bangunan tinggi kurang efektif. Semakin tinggi bangunan, nilai gaya aksial akibat beban gravitasi pada kolom akan semakin tinggi. Pengaruh gaya lateral dan tingginya gaya aksial yang bekerja pada kolom menuntut dimensi kolom yang besar dengan beton bertulang mutu normal. Karena batasan arsitektur yang ketat, insinyur struktur dapat mereduksi kolom dengan menggunakan beton bertulang mutu tinggi. Besarnya pengaruh deformasi dalam hal ini tidak dibahas.

Meskipun kekuatan normal beton bertulang memberikan banyak manfaat untuk bangunan bertingkat rendah, Jepang telah menghentikan pengaplikasiannya untuk bangunan bertingkat tinggi. Hal ini disebabkan karena kekuatan normal beton bertulang tidak bisa memberikan perlindungan tingkat tinggi untuk bahaya gempa pada bangunan. Berdasarkan latar belakang tersebut, pada tahun 1988, Kementerian Pembangunan Jepang bertekad untuk mendukung proyek penelitian dengan judul *“Development of Advanced Reinforced Concrete Buildings using High-strength Concrete and High-strength reinforcement* (biasanya disebut dengan “New RC”) (Aoyama 2001). Proyek ini dimulai dengan meningkatkan kekuatan dan kualitas beton yang tinggi dengan ditetapkan mutu beton dari 30 – 120 MPa, dan mutu baja tulangan dengan kuat lelehnya ditentukan dari 400 – 1200 MPa. Setelah beberapa tahun penelitian secara intensif, pada tahun 1995, beton mutu tinggi dengan kuat tekan beton dari 40 MPa sampai 100 MPa telah tercapai. Pada saat yang sama,

Jepang juga menghasilkan mutu tinggi untuk tulangan baja longitudinal yaitu dari 685 – 980 MPa (USD 685A, USD 685B dan USD 980) dan mutu baja tulangan transversal dari 785 – 1275 MPa (USD 785 dan USD 1275). Dengan memanfaatkan material tersebut, bidang baru bangunan beton bertulang terus dikembangkan (Aoyama 2001).

Pada tahun 2010, Taiwan Concrete Institute (TCI) melalui kelompok riset New RC melakukan pengamatan terhadap pemanfaatan bahan mutu tinggi untuk bangunan tinggi beton bertulang. Dari penelitian tersebut, beton mutu tinggi dengan kuat tekan dari 70 – 100 MPa diproduksi dan digunakan secara luas untuk bangunan tinggi. Terdapat dua tipe tulangan yang digunakan, yaitu tulangan longitudinal mutu tinggi dengan kuat leleh 685 MPa dan tulangan transversal dengan kuat leleh yang mencapai 785 MPa.

Sementara di Amerika Serikat, melalui ACI Committee 363 2010 penggunaan dan definisi beton mutu tinggi telah melalui perkembangan yang bertahap dan berkesinambungan selama bertahun-tahun. Beton dengan kuat tekan 34 MPa telah terhitung sebagai beton mutu tinggi pada tahun 1950. Pada tahun 1960, beton dengan kuat tekan 41 dan 52 MPa telah dikomersialkan. Saat ini, kuat tekannya mencapai 138 MPa telah digunakan dalam pengecoran di tempat pada bangunan tinggi.

Pada saat gempa, kegagalan geser yang terjadi pada kolom harus dihindari. Kegagalan geser pada kolom disebabkan hilangnya kekuatan lateral secara cepat. Kajian eksperimental mengenai perilaku geser pada beton bertulang telah dilakukan oleh Aoyama (2001), Maruta (2008), Sakaguchi et al. (1990), Kuramoto and Minami (1992), Watanabe and Kabesawa (1998), Jin et al. (2014), Ou and Kurniawan (2015a,2015b), Harun Alrasyid (2015). Secara umum hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa (1) Semakin tinggi beban aksial yang diberikan maka kuat geser beton ( $V_c$ ) akan semakin tinggi. (2) Tulangan mutu tinggi tidak mencapai kekuatan leleh pada saat kolom mengalami geser ultimate (3). Semakin tinggi beban aksial maka semakin cepat kolom kehilangan kekuatan gesernya.

Penelitian eksperimental mengenai perilaku geser kolom beton bertulang mutu tinggi telah banyak dilakukan. Namun demikian dalam praktiknya sangat besar dana yang dibutuhkan dalam melakukan sebuah studi eksperimental khususnya

terkait bidang teknik sipil. Oleh karenanya banyak dilakukan pendekatan numerikal maupun pemodelan menggunakan software dalam kajian perilaku geser struktur beton bertulang.

Menurut Toma et al. (2008), simulasi numerik dari prosedur eksperimental telah menunjukkan satu kecenderungan yang meningkat saat ini. Perlunya dilakukan model *Finite Element* yang teliti sehingga sesuai dengan sebuah hasil eksperimen. Kelebihan dalam menggunakan metode *Finite Element* banyak ragamnya diantaranya waktu yang lebih singkat sampai hasil analisis yang diperoleh, parameter dapat dengan mudah diubah untuk menilai pengaruhnya pada perilaku elemen struktural yang di analisis, dll. Toma et al, melakukan analisa terhadap tiga model kolom untuk mengetahui perilaku geser dari kolom tersebut, dimana mutu beton yang digunakan sebesar 30 N/mm<sup>2</sup>, tulangan longitudinal D22 SD1170, dengan luas tulangan  $A_s = 387.1 \text{ mm}^2$ . Kuat leleh dari tulangan longitudinal diukur dan nilainya sebesar  $f_y = 1198 \text{ N/mm}^2$ . Sementara untuk tulangan geser digunakan D6 SD295, dengan  $A_s = 31.67 \text{ mm}^2$ . Kekuatan tulangan geser,  $f_y = 350 \text{ N/mm}^2$ .

Mostafaei, Vecchio, and Kabeyasawa (2008) telah melakukan sebuah pemodelan untuk memprediksikan respon perpindahan yang terjadi pada kolom struktur beton bertulang dengan menggunakan dua program berbasis *Finite Element*, yaitu VecTor2 dan WCOMD yang mana merupakan software analisis yang akurat dalam praktek untuk menganalisis elemen beton bertulang hingga mencapai beban ultimit. Secara khusus, software VecTor2 sangat handal untuk analisis masalah geser-kritis, karena memberikan hasil yang dapat menjadi acuan, bahkan untuk respon pada pasca-puncak.

Dalam penelitian ini akan dilakukan pengkajian terhadap perilaku geser yang terjadi pada elemen struktur kolom beton bertulang mutu tinggi dengan menggunakan salah satu program berbasis *Finite Element*, yaitu VecTor2, dengan tujuan memprediksi perilaku geser kolom tersebut. Kemudian hasil *output* dari *running* programnya akan dilakukan perbandingan terhadap hasil uji eksperimental yang telah dilakukan sebelumnya.

## 1.2 Permasalahan

Dari uraian latar belakang diatas, maka permasalahan yang ingin dikaji dari tesis ini adalah bagaimana memprediksi perilaku geser kolom beton bertulang mutu tinggi dengan menggunakan metode *Finite Element*. Adapun detail rumusan masalah pada penelitian sebagai berikut :

- 1) Bagaimana cara memodelkan material beton mutu tinggi dan baja tulangan mutu tinggi.
- 2) Bagaimana cara memodelkan perilaku geser kolom beton bertulang mutu tinggi dengan program bantu VecTor2.
- 3) Bagaimana menyimpulkan perbandingan hasil analisa kolom beton bertulang mutu tinggi metode *Finite Element* dan hasil eksperimental.

## 1.3 Batasan Masalah

Untuk mempermudah dalam pembahasan, maka digunakan batasan masalah sebagai berikut :

- 1) Pemodelan dilakukan hanya dengan menggunakan satu program berbasis *Finite Element*, yaitu VecTor2.
- 2) Penampang kolom yang digunakan dalam pemodelan adalah kolom persegi.
- 3) Dalam penelitian ini tidak memperhitungkan ataupun membahas besarnya deformasi yang terjadi pada elemen kolom.

## 1.4 Tujuan

Dilihat dari permasalahan yang ada, maka tujuan dari kajian tesis ini adalah untuk memprediksi perilaku geser kolom beton bertulang mutu tinggi dengan menggunakan metode *Finite Element*. Berikut rincian tujuan dari penelitian ini :

- 1) Mendapatkan model material beton mutu tinggi dan baja tulangan mutu tinggi.
- 2) Mendapatkan model geser kolom beton bertulang mutu tinggi dengan program bantu VecTor2.
- 3) Mendapatkan kesimpulan dari perbandingan hasil analisa kolom beton bertulang mutu tinggi metode *Finite Element* dengan hasil eksperimental.

### **1.5 Manfaat**

Manfaat dari kajian perilaku geser kolom beton bertulang mutu tinggi menggunakan metode *Finite Element*, diantaranya :

- 1) Untuk masyarakat teknik sipil, yang mana untuk mengetahui perilaku geser pada sebuah elemen struktur sangatlah diperlukan, sehingga sebelum merencanakan sebuah struktur, dapat dilakukan dahulu model yang berbasis *Finite Element* untuk mengetahui geser yang terjadi.
- 2) Untuk penulis, tentunya sebagai pengetahuan baru yang dapat kemudian penulis aplikasikan di lapangan.



*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Pendahuluan**

Bab ini memberikan gambaran tentang literatur dan hasil eksperimen yang ada pada perilaku geser kolom mutu tinggi. Perkembangan beton mutu tinggi dan baja mutu tinggi di beberapa Negara akan dipaparkan secara eksplisit. Penelitian sebelumnya mengenai eksperimental dan pemodelan pada kolom beton mutu tinggi yang geser kritis dan baja mutu tinggi juga dilaporkan dalam bab tersebut.

#### **2.2 Bahan Mutu Tinggi**

##### **2.2.1 Beton Mutu Tinggi**

Mutu tinggi adalah istilah relatif yang tergantung pada banyak hal, seperti kualitas bahan yang tersedia secara lokal dan praktek konstruksi (Caldarone 2008). Kekuatan beton adalah properti material yang tergantung pada berbagai faktor. Pengukuran kekuatan beton dapat dipengaruhi oleh faktor primer seperti geometri spesimen, ukuran, umur, dan perawatan. Parameter pengujian peralatan seperti kapasitas pembebanan, kekakuan lateral dan longitudinal, tingkat pembebanan dan keseragaman distribusi beban juga dapat mempengaruhi kekuatan beton. Di daerah dimana kekuatan tekan beton dari 60 MPa diproduksi secara komersial secara rutin, beton mungkin tidak didefinisikan sebagai beton mutu tinggi sampai telah mencapai kekuatan yang diukur di sekitar 70 sampai 80 MPa. Sebaliknya, di daerah dimana kuat tekan beton dari 30 MPa tersedia secara komersial, beton yang berhasil memenuhi kebutuhan desain 40 MPa dapat dianggap sebagai beton mutu tinggi. Definisi beton mutu tinggi telah berubah selama bertahun-tahun. Di Amerika Serikat, pada 1950-an, beton mutu tinggi digambarkan untuk beton dengan kuat tekan lebih dari 34 MPa. Dalam 1960 – 1970 beton mutu tinggi telah digunakan secara komersial dengan kuat tekan dari 41 – 62 MPa. Saat ini, beton mutu tinggi tersedia secara komersial mulai dari 60 MPa sampai 100 MPa. Meskipun deskripsi

beton mutu tinggi telah berubah selama bertahun-tahun, Komite ACI 363 (2010) saat ini telah memilih 55 MPa sebagai batas bawah dari beton mutu tinggi.

Ada dua perbedaan utama antara beton mutu tinggi dan beton normal. Pertama adalah pertukaran dalam kekuatan dan kekakuan sifat relatif antara pasta dan agregat. Untuk beton mutu tinggi, partikel agregat terikat oleh bahan yang kuat dan padat. Hal ini kontras dengan partikel agregat dalam beton normal yang terikat oleh bahan yang lebih berpori lemah. Perbedaan kedua berfokus pada sifat-sifat zona transisi antar muka. Permukaan patahan pada beton mutu normal adalah kasar, dimana retak berkembang di sepanjang zona transisi antara matriks dan agregat. Permukaan retak pada beton mutu tinggi adalah halus, karena retak berkembang tanpa diskontinuitas antara matriks dan agregat. Kekuatan dan tingkat kompatibilitas kekakuan antara pengikat dan agregat sangat penting untuk beton mutu tinggi. Dari perspektif perilaku mekanik, kurva tegangan-regangan untuk beton mutu tinggi lebih linear dari beton normal. Regangan pada kuat tekan maksimum meningkat sebagai peningkatan kuat tekan. Pasca-puncak kurva tegangan regangan beton mutu tinggi lebih curam dari beton normal. Deformasi ultimit menurun dengan meningkatnya kekuatan.

## **2.2.2 Baja Tulangan Mutu Tinggi**

### **2.2.2.1 Baja tulangan mutu tinggi di Jepang dan Taiwan**

Pada tahun 1988 – 1995, Jepang melakukan proyek “New RC” untuk mempelajari penerapan beton mutu tinggi dan baja mutu tinggi dibawah gaya gempa oleh keanggotaan beton bertulang. Jenis baja mutu tinggi yang dikembangkan di Jepang adalah sebagai berikut: (1) USD 685A, USD 685B dan USD 980 diusulkan untuk digunakan sebagai tulangan longitudinal, (2) USD 785 dan USD1275 dimaksudkan untuk digunakan sebagai tulangan transversal. Meskipun tulangan baja mutu tinggi ini telah ditetapkan sebagai bagian dari standar konstruksi New RC oleh Kementerian Konstruksi (Aoyama 2001), tulangan baja mutu tinggi ini belum diterima dalam Japanese Industrial Standard (JIS) (Miyajima 2010; Nishiyama 2009).

Pada 1970-an sampai 1980-an, Taiwan menggunakan baja ulir dengan kuat leleh dari 280 MPa dan baja polos dengan kuat leleh 240 MPa dan 300 MPa untuk

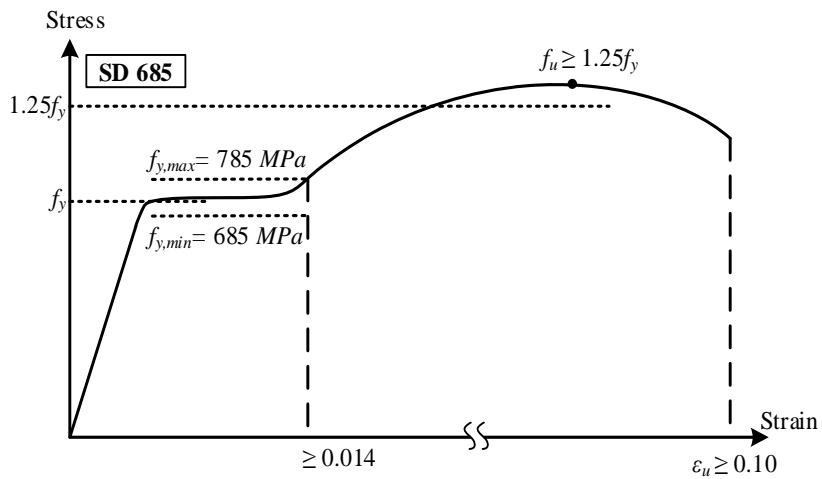
tulangan utama dalam konstruksi bangunan. Persyaratan ini ditingkatkan pada 1990-an sampai pada tahun 2000-an dengan kuat leleh 420 MPa dan 240 MPa untuk tulangan utama (Lee et al. 2011). Pada tahun 2010, Taiwan Concrete Institute (TCI) melalui kelompok riset New RC melakukan pengamatan terhadap pemanfaatan bahan mutu tinggi untuk bangunan tinggi beton bertulang. Berdasarkan proyek ini, mutu tinggi tulangan longitudinal (SD685) dan tulangan transversal (SD785) telah diproduksi untuk tujuan penelitian. Spesifikasi standar dari SD685 dan SD785 telah diatur dalam TCI New High-Strength Reinforced Concrete Committee (2014).

Batang SD685 diproduksi dengan memodifikasi sifat tarik dari batang USD685. Kedua tulangan diproduksi untuk menyesuaikan kondisi yang ada (Nishiyama 2009). Di Jepang, USD685 dikategorikan menjadi dua jenis: USD685A dan USD685B. USD685B diperlukan kuat leleh maksimum yang lebih rendah dan rasio yang lebih rendah dari kuat leleh untuk kekuatan tarik dari yang dibutuhkan untuk USD685A.

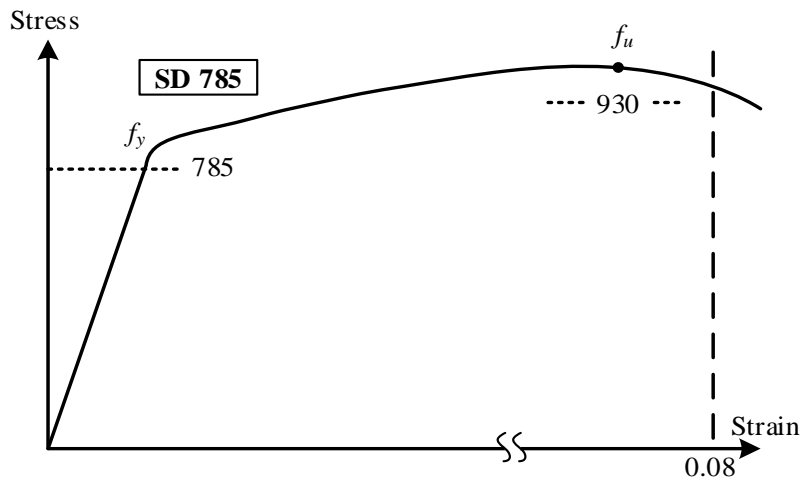
SD785 memiliki sifat tarik yang sama dengan USD785. Baja dengan diameter batang yang kecil tersebut digunakan sebagai tulangan transversal. Tulangan ini memiliki nilai kebutuhan batas bawah hanya untuk tegangan leleh. Tegangan leleh didefinisikan oleh 0,2 persen keseimbangan tegangan seperti pada standar saat ini. Tidak ada nilai yang jelas dari fase setelah terjadinya leleh yang ditunjukkan pada tulangan tersebut (Aoyama 2001). Sifat tarik tulangan mutu tinggi di Jepang dan Taiwan dapat dilihat pada Tabel 2.1. Kurva tegangan-regangan dari SD685 dan SD785 dapat dilihat pada Gambar 2.1 dan 2.2

**Tabel 2.1** Sifat Tarik Tulangan USD685, USD785 dari Jepang dan SD685, SD785 dari Taiwan

Kelas	USD685A	USD685B	USD785	SD685	SD785
Kuat Leleh , MPa	685-785	685-755	≥785	685-785	≥785
Kuat Tarik, min MPa	-	-	930	860	930
Regangan pasca leleh, min %	1.4	1.4	-	1.4	-
Pemanjangan total, min %	10	10	8	10	8
Rasio kuat Tarik min	1.18	1.25	-	1.25	-



**Gambar 2.1** Tulangan Longitudinal Mutu Tinggi SD685



**Gambar 2.2** Tulangan Transversal Mutu Tinggi SD785

#### 2.2.2.2 Baja tulangan mutu tinggi di Amerika Serikat

Baja tulangan dengan kuat leleh 550 MPa (kelas 80) pertama kali dihitung dalam ASTM A615 dan ASTM A706 (2009). Meskipun tulangan kelas 80 telah diproduksi di Amerika Serikat, namun hanya diproduksi untuk kebutuhan tertentu saja, tidak untuk pemakaian umum. Tulangan dengan kuat leleh 690 MPa (kelas 100) dan 840 MPa (kelas 120) pertama kali dimunculkan dalam ASTM A1035 (2014). Tulangan ini telah direkomendasikan oleh ACI ITG-6R-10 (2010) untuk meningkatkan kapasitas lentur dan aksial elemen beton bertulang. Perbandingan sifat tarik dari kelas 80 (ASTM A706), kelas 100, dan kelas 120 (ASTM A1035) tulangan baja dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2** Sifat Tulangan Tarik kelas 80, kelas 100 dan kelas 120

Kelas ksi [MPa]	Kelas 80 [550]	Kelas 100 [690]	Kelas 120 [830]
Kuat Tarik, min, ksi [MPa]	100 [1030]*	150 [1030]	150 [1030]
Kuat Leleh, min, ksi [MPa]	80 [550]	100 [690]**	120 [830]**
Kuat Leleh, max, ksi[MPa]	98[675]	-	-
Tegangan yg sesuai dengan ekstensi beban dibawah 0.0035 in/in, min	-	80 [550]	90 [620]
Pemanjangan total dalam 8 in [203.2 mm] min %			
Diameter Tulangan			
- 3 sampai 11 [10 sampai 36]	12	7	7
- 14,18 [ 43,57 ]	10	6	N.A.

\* Kekuatan tarik tidak kurang dari 1,25 kali kekuatan leleh aktual

\*\*Kuat leleh (0,2%) minimum

### 2.2.2.3 Baja tulangan mutu tinggi di beberapa Negara lain

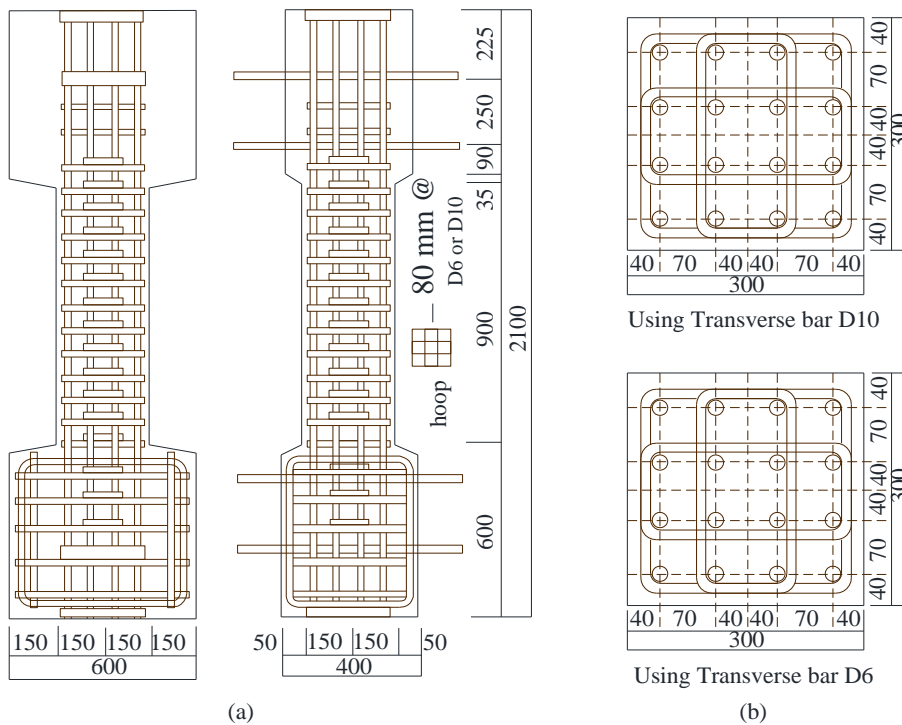
Ada beberapa jenis baja tulangan mutu tinggi yang tersedia di beberapa Negara lain yang umumnya tidak tersedia di Amerika Serikat. Selandia Baru, Australia dan China menghasilkan baja tulangan dengan kuat leleh dari 500 MPa. Di Selandia Baru dan Australia, tulangan ini harus memenuhi persyaratan untuk kelas 500E atau kelas 500N dari AS/NZS 4671 (2001). Kelas 500E diusulkan untuk digunakan dalam mendesain elemen struktur untuk menahan gaya gempa, sementara kelas 500N ditujukan untuk elemen struktur dengan persyaratan daktilitas kurang. China membuat tulangan HRB500 dan HRBF. Namun, pada 2010 tulangan ini belum termasuk dalam standar peraturan bangunan di China.

## 2.3 Eksperimental Program Sebelumnya

Hiroyuki Aoyama (2001) melakukan pengujian terhadap delapan kolom geser kritis dengan beton mutu tinggi dan baja mutu tinggi. Tujuan dari studi eksperimental ini adalah untuk mengamati kekuatan geser elastis kolom beton bertulang dengan mutu tinggi. Gambar 2.3 menunjukkan pendimensian dan

potongan melintang pada kolom. Kolom tersebut menggunakan USD685 16-D19 sebagai tulangan longitudinal dengan kuat leleh aktual 757 MPa sedangkan D6 atau D10 digunakan sebagai tulangan geser dengan menggunakan dua klasifikasi yang berbeda SD 345 dan USD 786/930. Kekuatan tekan beton pada umur pengujian adalah 73,5 MPa. Rasio beban aksial yang diterapkan dalam penelitian ini adalah 1/6 dan 1/3.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa semua kolom gagal pada geser sebelum mengalami leleh pada tulangan longitudinal. Aoyama (2001) mencatat bahwa kekuatan tulangan lateral ditunjukkan oleh pengaruh modulus kegagalan geser  $\rho_t f_{yt}$  secara signifikan. Ketika kekuatan tulangan lateral rendah, kolom gagal dalam geser yang tipikal, tetapi kolom dengan kekuatan tulangan lateral tinggi gagal dalam zona kompresi lentur. Spesimen kedua dan ketiga di setiap kelompok beban aksial yang tersedia dengan jumlah yang kurang lebih sama  $\rho_t f_{yt}$ . Spesimen kedua yang memiliki jumlah besar kekuatan tulangan lateral yang normal dapat menahan gaya geser lebih tinggi dari spesimen ketiga yang memiliki sejumlah kecil kekuatan tulangan lateral yang tinggi.



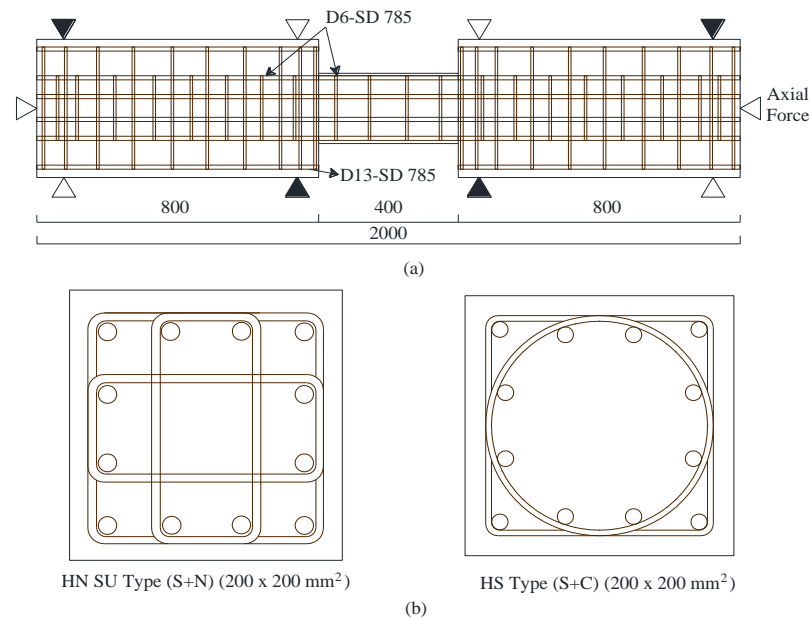
**Gambar 2.3** (a) Ukuran eksperimen kolom; (b) Potongan Kolom (Aoyama 2001).

**Tabel 2.3** Spesimen kolom, parameter dan beban yang diterapkan (Aoyama 2001).

Kolom	$P/A_g f'_c$	$d_{bt}$	$\rho_t$ (%)	$f_{yt}$ (MPa)	$\rho_t f_{yt}$ (MPa)	$V_{cr}$ (kN)	$V_u$ (kN)
6-1	1/6	D6	0.53	402	2.13	350	465.0
6-2		D10	1.19	409	4.87	425	665.5
6-3		D6	0.53	931	4.93	350	570.0
6-4		D10	1.19	1091	12.98	425	704.5
3-1	1/3	D6	0.53	402	2.13	475	532.0
3-2		D10	1.19	409	4.87	500	706.5
3-3		D6	0.53	931	4.93	475	585.0
3-4		D10	1.19	1091	12.98	500	744.0

$P/A_g f'_c$  : rasio beban aksial;  $d_{bt}$  : diameter tulangan lateral;  $\rho_t$  : rasio tulangan geser;  $f_{yt}$  : kuat leleh tulangan geser;  $V_{cr}$  : aplikasi beban pada retak diagonal ;  $V_u$  : aplikasi beban maksimum; Tulangan longitudinal 16-D19(=757 MPa)

Penelitian mengenai beton bertulang mutu tinggi juga dilakukan oleh Makoto Maruta pada tahun 2008 yang mempelajari perilaku geser dari 14 kolom beton mutu tinggi dan baja mutu tinggi. Kolom yang diuji tercantum dalam Tabel 2.4. Bentuk, ukuran dan potongan dari kolom ditunjukkan pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.4** (a) Ukuran specimen kolom; (b) Potongan kolom (Maruta 2008).



**Tabel 2.4** Spesimen kolom, parameter dan beban yang diterapkan (Maruta 2008).

Kolom	$f'_c$ (MPa)	Konfigurasi Senggang (series)	$P/A_g f'_c$	$\rho_t$ (%)	$f_{yt}$ (MPa)	$\rho_t f_{yt}$ (MPa)	$V_{cr}$ (kN)	$V_u$ (kN)
H-0.6-0.15	128	S+N(HN)	0.15	0.6	785	4.7	270	522
H-0.6-0.3	125		0.3				367	516
H-0.6-0.6	120		0.6				466	523
HS-0.6-0.3	128		0.3				400	494
HS-0.6-0.6	128	S+C(HS)					445	508
HS-1.2-0.6	129	S+N(HN)	0.6	1.2		9.4	533	588
H-0.3-0.6	128			0.3		2.4	431	485
H-1.2-0.6	121			1.2		9.4	555	681
H-1.8-0.6	130			1.8		14.1	588	778
H-0.3-0.3	130			0.3		2.4	394	524
H-1.2-0.3	121			0.3		9.4	354	689
H-1.8-0.3	121					14.1	439	798
U-0.4-0.6	130	S+C(U)	0.6	0.4	1275	4.7	478	508
U-0.7-0.6	129			0.7		9.41	506	561

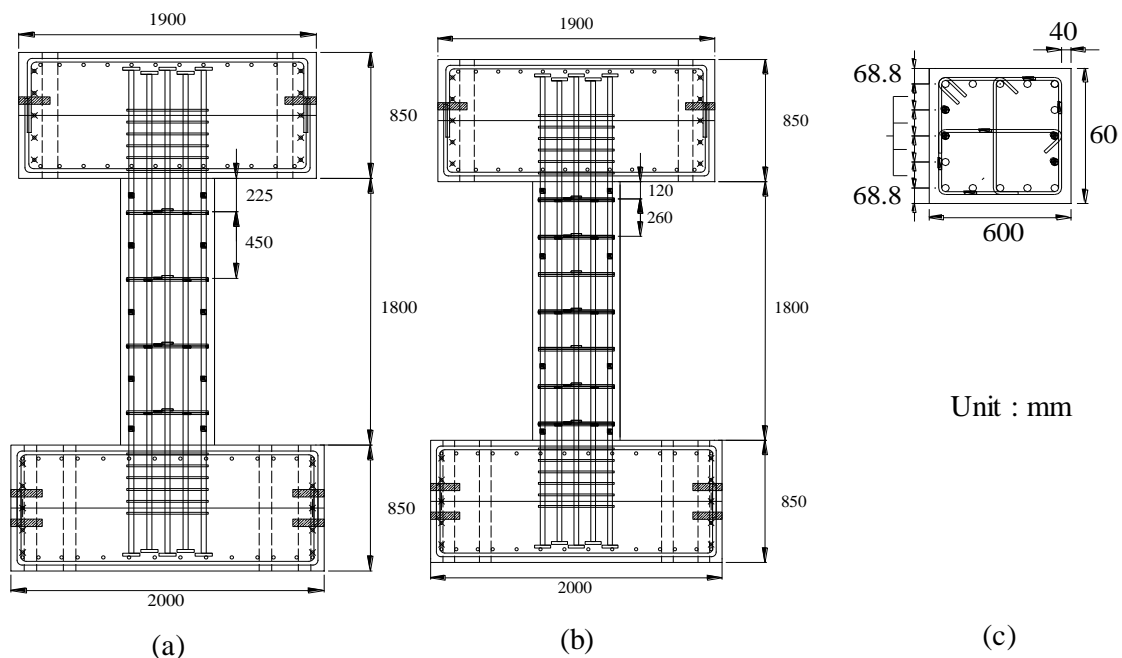
Tulangan Longitudinal 8-D13( $f_{yl} = 1030$  MPa)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa, kecuali untuk kolom H-1.8-0.6, tidak ada tulangan longitudinal yang leleh sebelum diberikan beban maksimum. Tidak ada retak lentur yang terjadi pada kolom di bawah rasio beban aksial tinggi 0.6. Banyak kolom yang sengkangnya tidak mencapai leleh, sehingga beton hancur terlebih dahulu sebelum terjadi pelelehan pada sengkangnya. Pada kolom dengan rasio beban aksial 0.3, menunjukkan regangan untuk kolom dengan  $\rho_t$  rendah lebih besar dari pada regangan untuk kolom dengan  $\rho_t$  tinggi pada sudut rotasi yang sama. Jumlah tambahan  $\rho_t$  pada rasio beban aksial yang sama akan meningkatkan kekuatan maksimum. Kolom dengan  $\rho_t$  yang sama menunjukkan kesamaan kekuatan maksimum untuk rasio beban aksial yang berbeda.

Ou dan Kurniawan pada tahun 2015 melakukan pengujian eksperimental pada empat titik kegagalan geser kolom mutu tinggi. Program percobaan terdiri dari

16 kolom kurvatur ganda dengan dimensi 600 x 600 mm dan tinggi 1800 mm. Kolom yang diperkuat dengan tulangan longitudinal mutu tinggi D32 (# 10) SD685 dan D13 (# 4) SD785 untuk tulangan transversal mutu tinggi. Kuat tekan yang diberikan sebesar 70 MPa dan 100 MPa. Empat tingkat rasio tekan aksial yang diamati diantaranya 10% (Seri-A), 20% (Seri-B), 30% (Seri-C) dan 40% (Seri-D). Kolom yang diuji tercantum dalam Tabel 2.5, sementara bentuk, ukuran dan potongan dari kolom ditunjukkan pada Gambar 2.5.

Hasil eksperimental dari 8 kolom mutu tinggi menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan gaya tekan aksial dari  $0,1 f_c' A_g$  sampai  $0,4 f_c' A_g$ , pola retak geser secara bertahap berubah dari retakan lentur-geser ke retakan web-geser dari kolom tersebut dengan sudut retak diagonal rata-rata pada perubahan kondisi akhir dari 33-15 derajat. Untuk sebagian besar kolom dengan beban aksial ( $0,3 f_c' A_g$  dan  $0,4 f_c' A_g$ ), redistribusi gaya internal setelah retak diagonal tidak terjadi secara sukses. Kolom-kolomnya mengalami kegagalan pada drift yang sama sebagai retak diagonal.



**Gambar 2.5** Desain Spesimen: (a) spesimen A-1,A-2,B-1,B-2,C-1,C-2,D-1,D-2; (b) specimen A3,A-4,B-3,B-4,C-3,C-4,D-3,D-4. (Ou and Kurniawan 2015b)

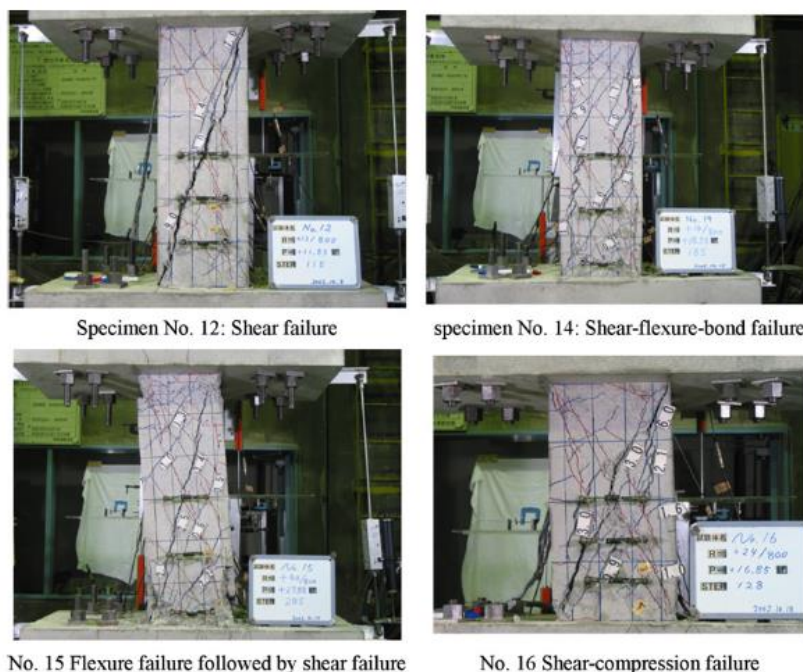
**Tabel 2.5** Kontribusi kuat geser oleh beton dan baja pada kondisi retak diagonal

Kolom	$f'_c$ (MPa)	Drift Rasio (%)	Kondisi Retak			
			$\sigma_{st}$ , MPA	$V_{test}$ , kN	$V_{s,test}$ , kN	$V_{c,test}$ , kN
A-1	92.5	0.35	243	1578	150	1428
A-2	99.99	0.33	235	1638	150	1488
A-3	96.9	0.32	359	1772	413	1359
A-4	107.1	0.33	418	1781	447	1334
B-1	108.3	0.45	223	2078	165	1913
B-2	125	0.41	183	2298	195	2103
B-3	112.9	0.40	214	2418	411	2007
B-4	121	0.42	380	2528	522	2006
C-1	104.1	0.42	28	2036	45	1991
C-2	138.8	0.60	28	2958	39	2919
C-3	104.6	0.38	602	2210	1140	1070
C-4	130.0	0.62	32	3018	68	2950
D-1	101.0	0.37	30	2239	46	2193
D-2	125.5	0.46	24	2486	36	2450
D-3	106.4	0.45	32	2355	77	2278
D-4	127.8	0.44	38	2547	92	2455

$\sigma_{st}$  : tulangan tegangan geser;  $V_{test}$  : kuat geser eksperimental;  $V_{s,test}$  : kuat geser eksperimental disediakan oleh tulangan geser;  $V_{c,test}$  : kuat geser eksperimental disediakan oleh beton;

Berdasarkan hasil eksperimen Mostafaei, Vecchio, and Kabeyasawa (2008), spesimen No. 12, dengan rasio tulangan transversal terendah, gagal dalam geser dengan celah geser dominan terlihat jelas di permukaannya. Respon lentur diperlihatkan oleh spesimen No. 15 dengan drift ratio sekitar 3,5%, diikuti oleh kegagalan geser. Kolom Nomor 14 pertama gagal pada *bond-flexure* dan kemudian menunjukkan geser dan terjadinya retak pada permukaannya. Sementara untuk kolom Nomor 16, spesimen terpendek, gagal dalam geser-tekan sebelum mencapai kapasitas beban lentur. Gambar 2.6 menggambarkan pola retak dan kegagalan

untuk spesimen No. 12 ke No. 15 secara cepat setelah kegagalan geser pada pasca-puncak.



**Gambar 2.6** Pola retak dan model kegagalan kolom (Mostafaei, Vecchio, and Kabeyasawa 2008).

**Tabel 2.6** Perbandingan hasil eksperimen dan analitis (Mostafaei, Vecchio, and Kabeyasawa 2008).

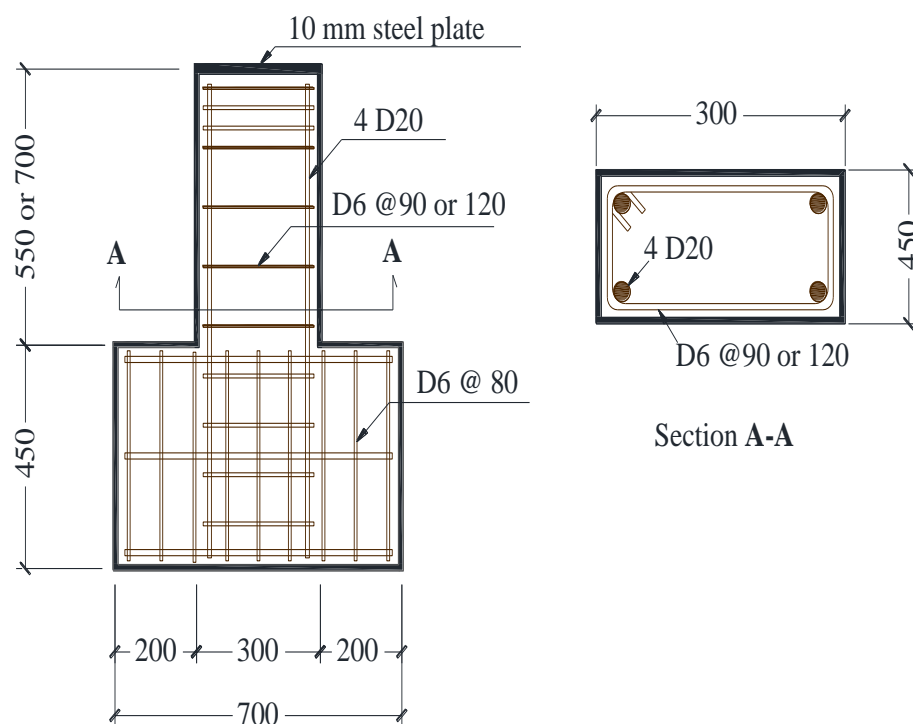
Spesimen	Hasil	Percobaan	VecTor2		WCOMD		ASFI	
			Analisis	Analisis / Percobaan	Analisis	Analisis / Percobaan	Analisis	Analisis / Percobaan
No. 12	UL (kN)	256	252	0.98	267	1.04	262	1.02
	UD (mm)	4.5	4	0.89	6	1.33	4.5	1
	$E$ (N/mm)	79000	85000	1.08	66000	0.84	79500	1.01
	$E_p$ (N/mm)	18000	17500	0.97	-	-	18500	1.03
No. 14	UL (kN)	300	303	1.01	297	0.99	305	1.02
	UD (mm)	9	13	1.44 <sup>a</sup>	8	0.89	12.4	1.38 <sup>a</sup>
	$E$ (N/mm)	67000	66500	0.99	66500	0.99	67000	1
	$E_p$ (N/mm)	4000	-	-	-	-	4100	1.02
No. 15	UL (kN)	339	346	1.02	340	1	341	1.01
	UD (mm)	31.5	33	1.05	32	1.02	30	0.95
	$E$ (N/mm)	59000	58500	0.99	55000	0.93	58500	0.99
	$E_p$ (N/mm)	2400	-	-	-	-	2450	1.02
No. 16	UL (kN)	348	360	1.03	344	0.99	348	1
	UD (mm)	6	5.7	0.95	6.2	1.03	5.9	0.98

$E$ (N/mm)	110000	120000	1.09	110000	1	107000	0.97
$E_p$ (N/mm)	12000	11500	0.96	-	-	13000	1.08

<sup>a</sup>Kegagalan sengkang diamati untuk No. 14 selama pengujian meski perilakunya tidak dimodelkan dalam analisis. UL: Beban ultimate rata-rata, UD: Simpangan ultimate,  $E$ : Kekakuan pra-puncak rata-rata,  $E_p$ : Kekakuan pasca-puncak rata-rata

Dalam eksperimen yang dilakukan oleh Jin et al. (2014), dengan membuat tujuh spesimen kolom beton bertulang mutu tinggi dan satu kolom beton bertulang mutu normal yang diuji dengan beban aksial konstan dan beban siklik horisontal. Spesimen yang diuji mewakili bagian kolom yang ada pada bangunan biasa, antara momen maksimum dan titik terjadinya lentur. Masing-masing spesimen kolom memiliki dimensi 150x300x550 mm yang dicor langsung dengan tumpuan balok dengan dimensi 300x450x700 mm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Dimana rasio tulangan longitudinal sama dengan 2,8 % untuk semua spesimen.

Perilaku keseluruhan dari kolom beton bertulang mutu tinggi saat diamati menjadi lebih rapuh dibandingkan kolom mutu normal dengan kondisi yang sama, yakni belum mencapai geser yang tinggi, sehingga pada akhirnya menunjukkan daktilitas dan energi disipasi yang relatif rendah. Meskipun peningkatan kapasitas geser, tekan aksial tinggi, memiliki efek negatif pada perilaku inelastis kolom, termasuk penurunan kapasitas daktilitas dan energi disipasi, percepatan dari degradasi kekuatan dan kekakuan, penurunan rotasi plastik, dan tidak adanya peringatan sebelum terjadi kegagalan. Dalam beberapa hal tertentu, jumlah yang lebih besar dari tulangan transversal dapat meningkatkan perilaku inelastis, meskipun kurang efisien dalam kapasitas geser. Hasil eksperimen tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.7.

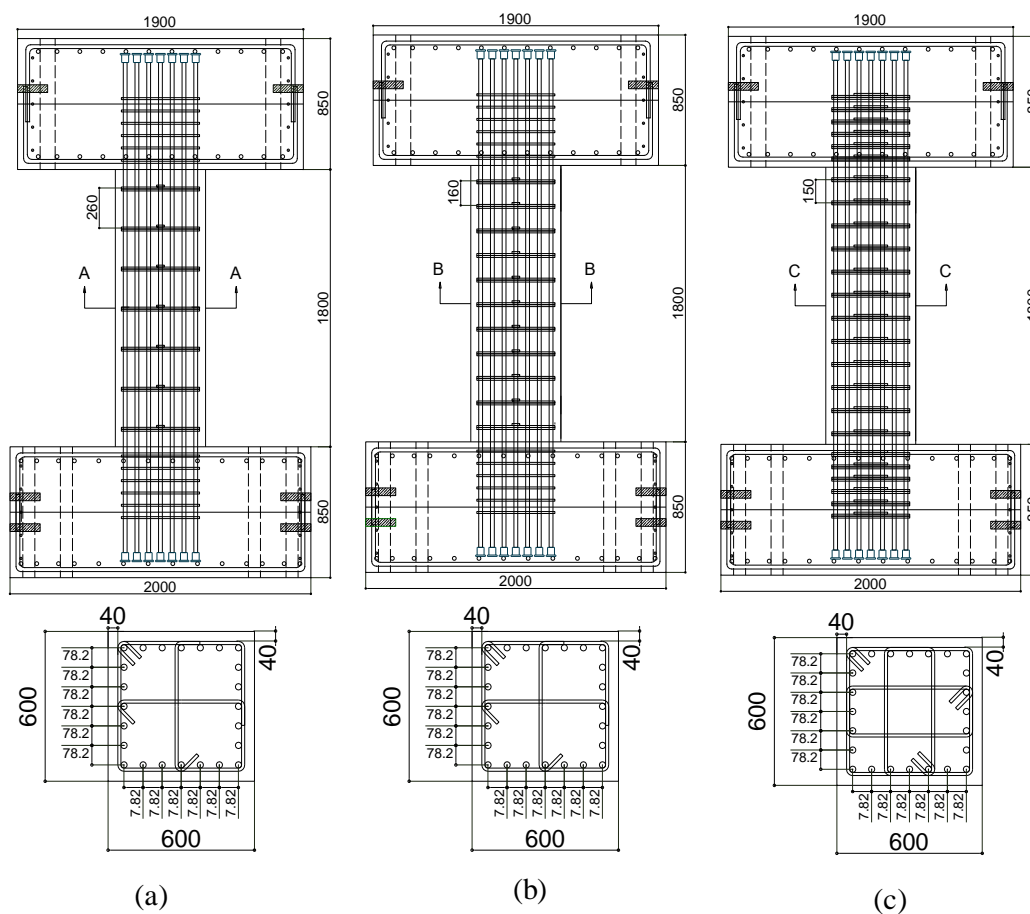


**Gambar 2.7** Detailing Spesimen, satuan dalam mm (Jin et al., 2014).

**Tabel 2.7** Rekapitulasi hasil eksperimen (Jin et al., 2014).

Spesimen	$V_{cr}$ (kN)	$V_{ci}$ (kN)	$V_y$ (kN)	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_{ys}$ (mm)	$\Delta_{yB}$ (mm)	$V_{max}$ (kN)	$\Delta_{max}$ (mm)	$V_u$ (kN)	$\Delta_u$ (mm)	$\mu$	$\Delta_u / \Delta_{max}$
HC-1	140	93.54	-316.43	-7.26	-6.60	-4.75	-396.10	-10.87	-316.00	-12.77	1.76	1.17
			274.38	6.8	6.20	4.75	345.41	9.63	273.22	12.31	1.81	1.28
HC-4	140	93.54	-294.64	-7.92	-7.20	-4.75	-364.46	-13.14	-290.77	-16.92	2.14	1.29
			257.51	7.34	6.65	4.75	329.61	11.42	-	-	-	-
HC-5	160	104.22	-350.13	-10.3	-9.35	-4.75	-411.76	-12.92	-329.00	-13.14	1.28	1.02
			337.62	8.34	7.50	4.75	360.52	9.24	-	-	-	-
HC-6	120	88.61	-229.95	-9.88	-9.88	-6.63	-259.21	-10.89	-207.00	-12.57	1.27	1.15
			204.98	7.01	7.02	6.63	229.24	8.37	-	-	-	-
HC-8	140	97.65	-294.12	-7.24	-7.22	-6.63	-312.37	-7.61	-	-	-	-
			238.36	6.17	6.17	6.63	326.65	11.02	211.86	11.02	1.77	1.00
HC-9	140	97.65	-230.61	-6.17	-6.18	-6.63	-299.70	-14.55	-	-	-	-
			188.67	6.12	6.11	6.63	233.74	12.34	187.00	14.10	2.30	1.14
HC-10	120	88.61	-211.64	-8.46	-8.45	-6.63	-300.08	-15.30	-243.12	-18.00	2.13	1.18
			245.99	8.61	8.58	6.63	288.60	17.86	230.58	20.03	2.33	1.12
PC-2	80	60.64	-200.03	-11.1	-11.12	-6.18	-237.99	-13.47	-190.54	-25.70	2.31	1.91
			134.59	8.28	8.26	6.18	151.12	13.60	121.54	27.76	2.35	2.04

Sementara Harun Alrasyid (2015) melakukan penelitian terhadap 9 kolom beton bertulang mutu tinggi dibawah kombinasi beban siklik dan beban tekan aksial konstan dengan menggunakan mutu beton 70 MPa, mutu baja tulangan longitudinal (SD685) dan tulangan transversal (SD785) yang memiliki spesifikasi kuat leleh 685 MPa dan 785 MPa. Beberapa parameter yang dipertimbangkan dalam ekperimental tersebut adalah varian tekan aksial dan jumlah tulangan geser. Semua kolom menunjukkan kegagalan geser sebelum terjadi leleh pada tulangan longitudinal. Tidak semua kolom mencapai tegangan leleh pada tulangan gesernya pada kondisi ultimate. Berdasarkan pengukuran regangan di tulangan geser pada kondisi ultimate, batas tegangan leleh dalam ketentuan desain geser ACI dapat ditingkatkan hingga 600 MPa. Hasil eksperimen, bentuk dan ukuran kolom dapat dilihat pada Tabel 2.8 dan Gambar 2.8 berikut.



**Gambar 2.8** Desain Spesimen: (a) spesimen A-3.1, B-3.1; (b) spesimen B-5, C-5, D-5; (c) spesimen A-6, B-6, C-6, D-6 (Alrasyid 2015).

**Tabel 2.8** Pengaplikasian beban kolom pada retak diagonal dan kondisi ultimate (Alrasyid 2015).

Kolom	$f'_c$ (Mpa)	$\rho_w$ (%)	$P/A_g f'_c$	Kondisi Retak Diagonal*		Kondisi Ultimate <sup>†</sup>	
				Aktual (Nominal) Drift (%)	$V_{test}$ (kN)	Aktual (Nominal) Drift (%)	$V_{test}$ (kN)
A-3.1	92.2	0.26	0.1	0.37(0.50)	1348	0.84(1.00)	1817
A-6	90.8	0.59		0.35(0.50)	1336	1.82(2.00)	2480
B-3.1	78.0	0.26	0.2	0.52(0.75)	1999	0.52(0.75)	1999
B-5	78.0	0.41		0.48(0.75)	1770	0.68(1.00)	2195
B-6	101.1	0.59		0.50(0.75)	2167	1.19(1.50)	2856
C-5	79.6	0.41	0.3	0.48(0.75)	2400	0.48(0.75)	2400
C-6	80.3	0.59		0.64(1.00)	2482	1.07(1.50)	3039
D-5	82.8	0.41	0.4	0.49(0.75)	2560	0.49(0.75)	2560
D-6	84.9	0.59		0.46(0.75)	2383	0.70(1.00)	2535

\*Tampilan pertama retak geser diagonal.

<sup>†</sup>Penerapan beban ultimate.

## 2.4 Program Finite Element

Metode elemen hingga pertama kali diusulkan di tengah tahun 1950-an oleh para peneliti mekanika struktural pesawat di Eropa dan Amerika Utara. Selanjutnya penelitian dan pengembangan energik yang dilakukan pada "matriks analisis struktural". Kompetisi internasional pada pengembangan ruang memberi dorongan untuk gerakan ini, dan *Boeing Corporation* mengembangkan metode tersebut menggunakan prinsip energi yang nyaman untuk menganalisis struktur yang rumit. Teknik ini dirumuskan dalam bentuk matriks, dan kejelasan yang tepat untuk penanganan komputer. Metode ini pun diperkenalkan ke disiplin lain dari rekayasa struktural seperti teknik sipil, arsitektur, galangan kapal dan teknik mesin (Dowel and Parker 2002). Dalam teknik sipil sendiri, terdapat berbagai macam program yang berbasis *Finite Element* yang digunakan untuk menganalisa perilaku struktur.

Dalam penelitian ini, akan digunakan VecTor2 sebagai program berbasis *Finite Element* untuk memodelkan kolom beton bertulang mutu tinggi dan menganalisa geser yang terjadi.



#### 2.4.1 VecTor2

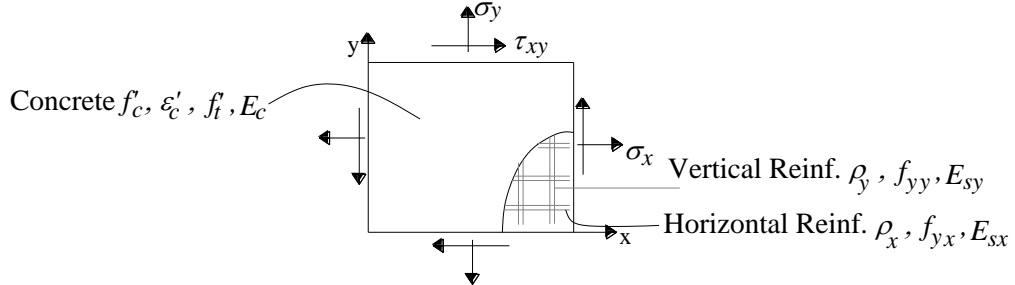
VecTor2 adalah program elemen hingga nonlinier untuk menganalisis struktur beton bertulang dua dimensi. Program ini telah dikembangkan di University of Toronto sejak 1990, ketika versi aslinya dikenal sebagai TRIX. Perkembangan ini bertepatan dengan tes eksperimental untuk menguatkan kemampuan VecTor2 dalam memprediksi respon beban-deformasi berbagai struktur beton bertulang yang menunjukkan pola retak ketika diberikan beban statis monoton jangka pendek dan beban siklik. Model elemen hingga dibangun untuk VecTor2 menggunakan *fine mesh low-powered elements*. Metodologi ini memiliki keuntungan efisiensi komputasi dan stabilitas numerik. Hal ini juga cocok untuk struktur beton bertulang yang membutuhkan mesh yang relatif baik untuk model penguatan merinci dan pola retak lokal (Wong, Vecchio, and Trommels 2002).

#### *Konsep Dasar VecTor2*

VecTor2 adalah sebuah program yang didasarkan pada *Disturbed Stress Field Mode* (Vecchio et al, 2000) sebuah perbaikan dari *Modified Compression Field Theory* (Vecchio and Collins, 1986) untuk analisis statis dan dinamis elemen hingga pada struktur membran beton bertulang. Hal ini didukung oleh program FormWorks sebagai pre-processor untuk konfigurasi struktural, dan oleh program Augustus sebagai post-processor untuk memvisualisasikan hasil dari VecTor2. Berikut deskripsi singkat tentang *Modified Compression Field Theory*.

MCFT didasarkan pada formulasi rata-rata regangan utama dalam elemen yang mengarah pada perhitungan tegangan utama rata-rata pada beton melalui hubungan konstitutif nonlinier yang realistis. Transformasi tegangan utama beton rata-rata menjadi sumbu koordinat global dan menjumlahkan tegangan baja rata-rata memperoleh tegangan total rata-rata pada elemen tersebut. Ada dua cek dalam proses perhitungan yang berkaitan dengan zona retak. Yang pertama adalah dengan memastikan bahwa tegangan pada beton dapat ditransfer melalui retak yang terjadi. Yang kedua adalah untuk memastikan bahwa tegangan geser pada permukaan retak tidak melebihi batas maksimum yang diberikan oleh agregat yang saling mengikat. Elemen beton bertulang, dalam *Modified Compression Field Theory*, dapat

digambarkan sebagai *free body diagram* dari elemen membran yang digambarkan pada Gambar 2.9 (Mostafaei, Vecchio, and Kabeyasawa, 2008).



**Gambar 2.9** Membran elemen beton bertulang yang diberikan tegangan bidang.

Hubungan kompatibilitas pada MCFT dinyatakan oleh persamaan berikut berdasarkan regangan rata-rata pada beton dan tulangan :

$$\epsilon_x = \epsilon_{cx} = \epsilon_{sx} \quad 2.1$$

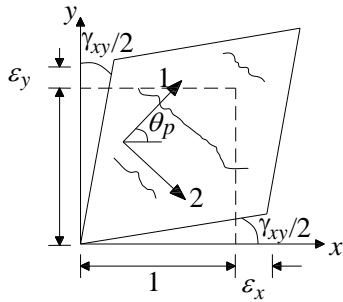
$$\epsilon_y = \epsilon_{cy} = \epsilon_{sy} \quad 2.2$$

Dimana  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  adalah regangan rata-rata pada arah x dan y, ditunjukkan pada Gambar 2.10,  $\epsilon_{sx}$ ,  $\epsilon_{sy}$  adalah masing-masing regangan dari tulangan yang paralel dengan arah x dan y, dan  $\epsilon_{cx}$ ,  $\epsilon_{cy}$  adalah regangan beton pada arah x dan y. Untuk elemen geser pada bidang, ditunjukkan pada Gambar 2.11.

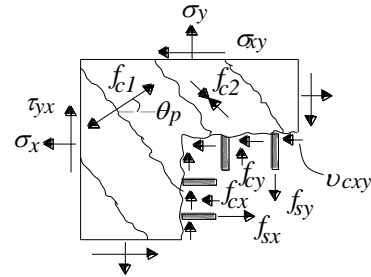
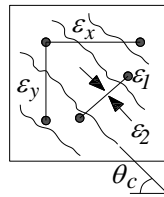
Kondisi kesetimbangan dapat dipenuhi dengan menyeimbangkan resultan tegangan normal yang diterapkan ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ ) oleh resultan tegangan beton rata-rata ( $f_{cx}$ ,  $f_{cy}$ ,  $v_{cxy}$ ) dan tegangan tulangan ( $f_{sx}$ ,  $f_{sy}$ ). Keseimbangan momen memerlukan tegangan geser yang diterapkan,  $\tau_{xy}$ , adalah seluruhnya dilawan oleh tegangan geser rata-rata pada beton,  $v_{cxy}$ . Berdasarkan free body diagram dari elemen membran, pada Gambar 2.11, hubungan kesetimbangan untuk tegangan rata-rata dapat disederhanakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= f_{cx} + \rho_x \cdot f_{sx} \\ \sigma_y &= f_{cy} + \rho_y \cdot f_{sy} \\ \tau_{yx} &= v_{cxy} \end{aligned} \quad 2.3$$

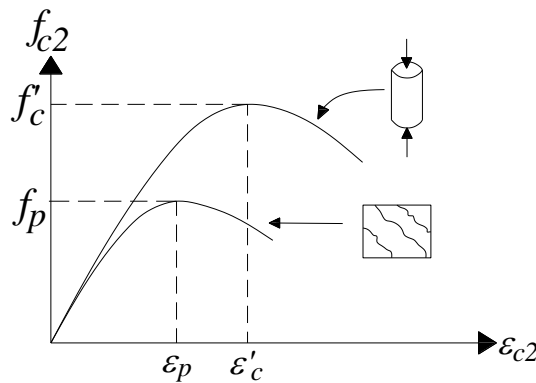
Dimana,  $\sigma_x$  = tegangan total pada arah x,  $\sigma_y$  = tegangan total pada arah y,  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$  = tegangan geser,  $f_{cx}$  = tegangan beton pada arah x,  $f_{cy}$  = tegangan beton pada arah y,  $v_{cxy} = v_{cyx}$  = tegangan geser beton relatif pada arah x dan y,  $f_{sx}$  = tegangan tulangan rata – rata pada arah x,  $f_{sy}$  = tegangan tulangan rata – rata pada arah y,  $\rho_x$  and  $\rho_y$  adalah rasio masing-masing tulangan pada arah x dan y.



**Gambar 2.10** Regangan rata-rata pada beton dan tulangan.



**Gambar 2.11** Bidang geser elemen beton bertulang



**Gambar 2.12** Hukum konstitutif untuk beton pada arah tekan utama.

Retak beton bertulang diperoleh dari studi eksperimental pada elemen panel yang diberikan tegangan pada bidang panel tersebut dengan menggunakan Panel Element Tester di University of Toronto (Vecchio and Collins 1986, 1993). Hasil pengujian dianalisa untuk mengembangkan model konstitutif retak beton dalam kondisi tekan dan tarik. Ditemukan bahwa retakan beton menghasilkan degradasi kekuatan, kekakuan dan daktilitas beton pada kondisi tekan. Gambar 2.12. mengilustrasikan hukum konstitutif untuk beton pada arah tekan utama, seperti yang diterapkan dalam *modified compression field theory*.

$$f_{cx} = \beta f'_c$$

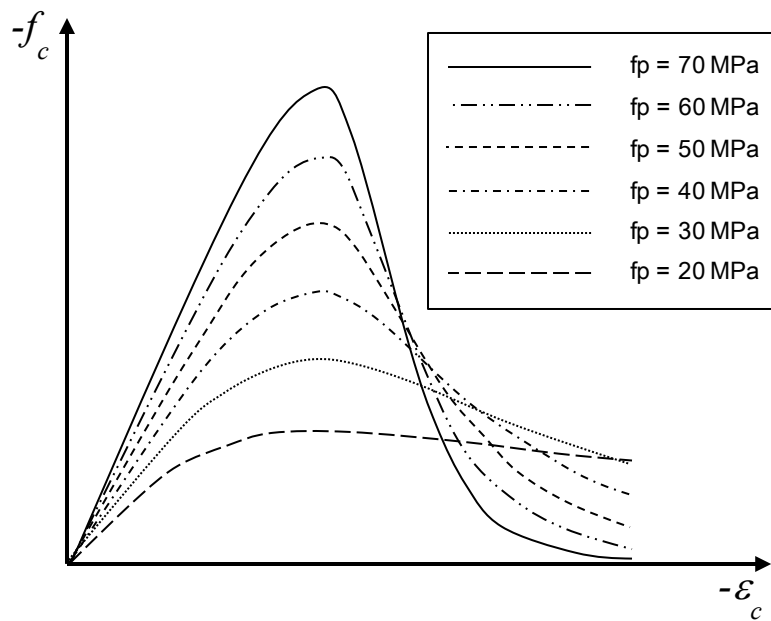
$$\varepsilon_p = \beta \varepsilon'_c$$

$$\frac{1}{1 + C_s C_d} \leq 1.0$$

2.4

#### 2.4.2 Model Material Pada VecTor2

##### *Model material beton mutu tinggi*



**Gambar 2. 13** Respon Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Popovics Pada Pra- dan Pasca Puncak

Kurva tegangan-regangan Popovics ditentukan oleh persamaan berikut.

$$f_{ci} = - \left( \frac{\varepsilon_{ci}}{\varepsilon_p} \right) f_p \frac{n}{n - 1 + (\varepsilon_{ci}/\varepsilon_p)^{nk}} \text{ untuk } \varepsilon_{ci} < 0 \quad 2.5$$

$$n = 0.80 + \frac{f_p}{17} \text{ (} f_p \text{ dalam MPa)} \quad 2.6$$

$$k = \begin{cases} 1.0 & \text{untuk } \varepsilon_p < \varepsilon_{ci} < 0 \\ 0.67 + \frac{f_p}{62} \geq 1.0 & \text{untuk } \varepsilon_{ci} < \varepsilon_p < 0 \text{ (} f_p \text{ dalam MPa)} \end{cases} \quad 2.7$$

$$E_c = \frac{f_p}{|E_p|} \cdot \frac{n}{n-1} \quad 2.8$$

Dimana :

$f_p$  = Puncak tegangan tekan beton

$\varepsilon_p$  = Puncak regangan tekan beton

$E_c$  = Initial tangent stiffness of concrete

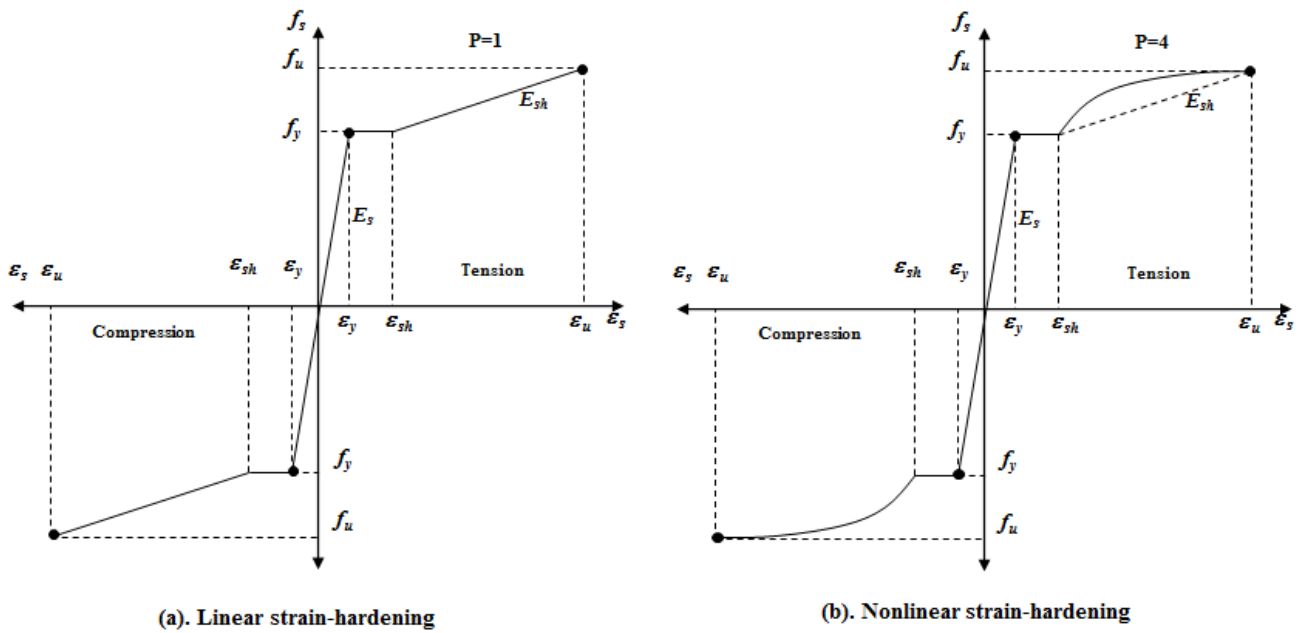
$E_s$  = Initial tangent stiffness of reinforcement

$E_{sec}$  = Secant stiffness

$k$  = Parameter kerusakan pada pasca puncak untuk respon tegangan-regangan tekan beton

$n$  = Kurva parameter untuk respon tegangan-regangan tekan beton

### Model material baja tulangan



**Gambar 2. 14** Respon Daktail Tegangan-Regangan Baja Tulangan

Tegangan tarik dan tekan pada tulangan ditentukan dengan persamaan berikut.

$$f_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_y & \text{untuk } E_s \leq \varepsilon_y \\ f_y & \text{untuk } \varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh} \\ f_u + (f_y - f_u) \left( \frac{\varepsilon_u - \varepsilon_s}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right)^p & \text{untuk } \varepsilon_{sh} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_u \\ 0 & \text{untuk } \varepsilon_u < \varepsilon_s \end{cases} \quad 2.9$$

$$E_{sh} = \left( \frac{f_u - f_y}{\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}} \right) \quad 2.10$$

Dimana :

- $\varepsilon_s$  = Regangan tulangan
- $\varepsilon_{sh}$  = Regangan tulangan pada strain hardening
- $\varepsilon_y$  = Total regangan aksial arah y
- $\varepsilon_u$  = Regangan ultimit tulangan
- $f_y$  = Kuat leleh baja
- $f_u$  = Kekuatan ultimit
- $E_s$  = Modulus elastisitas
- $E_{sh}$  = Modulus strain-hardening
- $p$  = Parameter strain-hardening

#### 2.4.3 Batasan Program VecTor2

Sebagai salah satu program *Nonlinear Finite Element Analysis* (NLFEA), VecTor2 digunakan dalam menganalisis elemen struktur beton bertulang dengan pembebanan tertentu. VecTor2 juga memiliki batasan dalam memodelkan sebuah elemen struktur, diantaranya yaitu :

- Jumlah maksimum elemen yang dianalisa sebanyak 6000 elemen.
- Jumlah maksimum node yang dianalisa sebanyak 5200 node.
- 3200 bandwidth
- 25 jenis tipe material beton

- 25 jenis tipe material baja

Dengan batasan-batasan tersebut diatas, maka VecTor2 belum bisa digunakan dalam menganalisa elemen struktur yang sifatnya lebih kompleks.

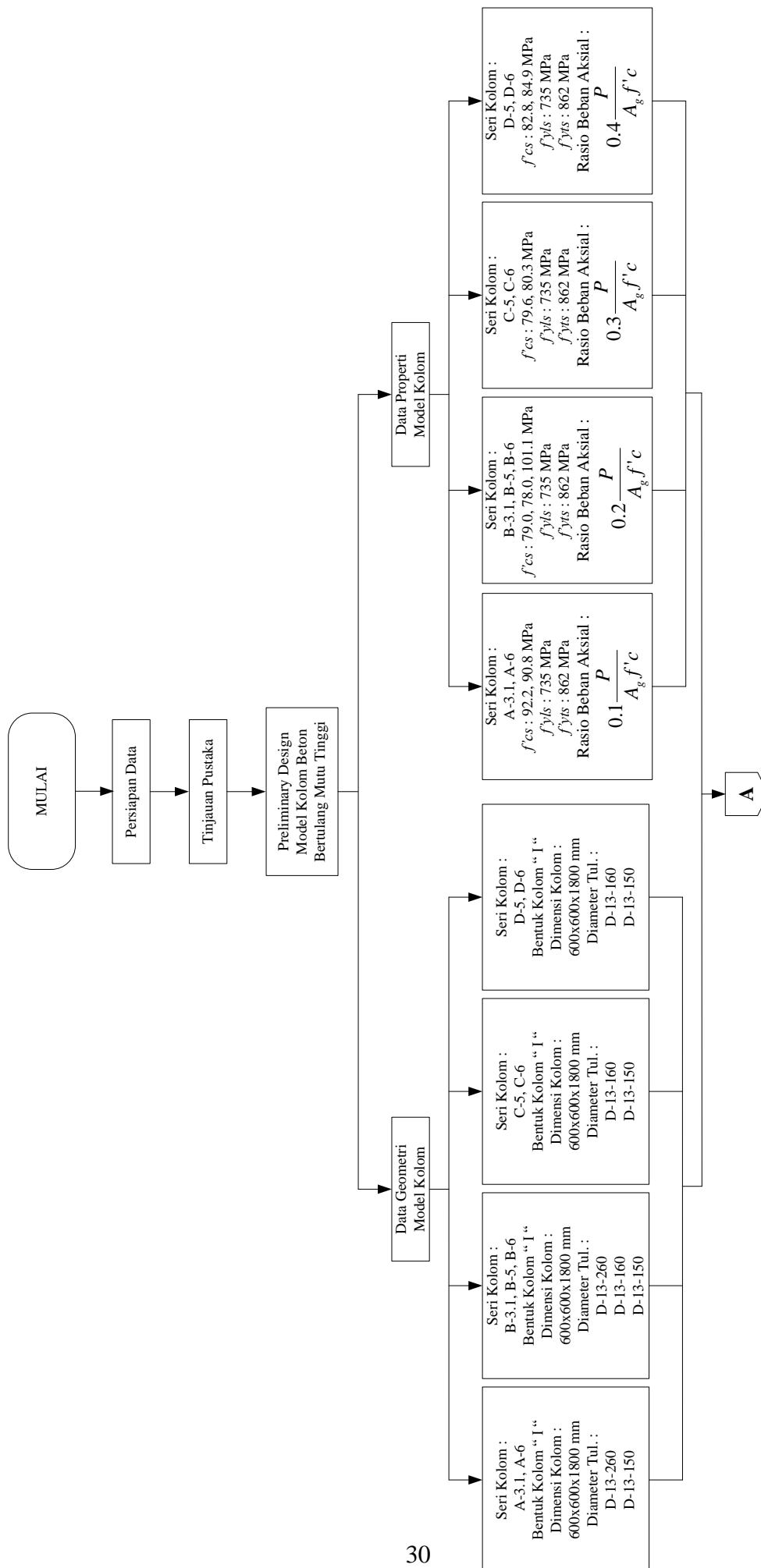
## **BAB 3**

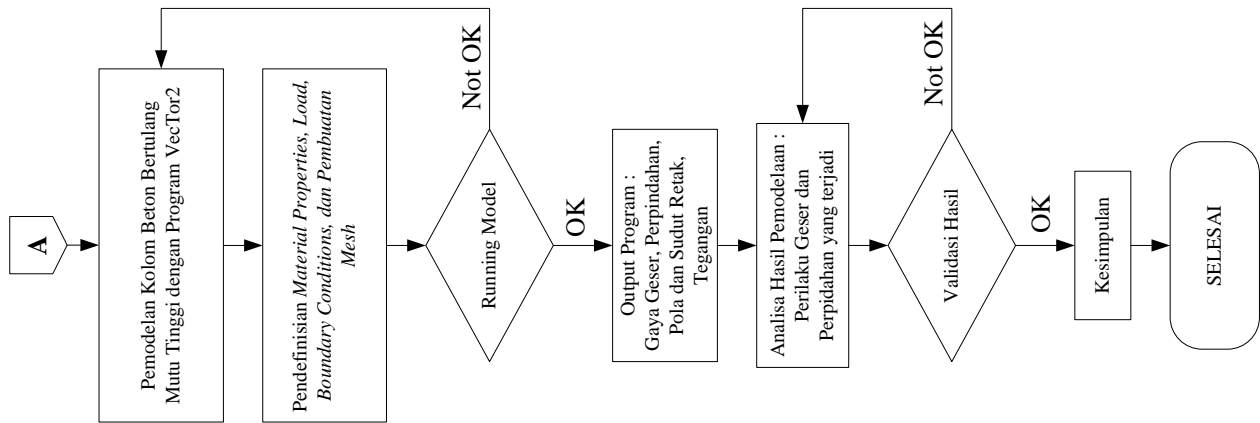
### **METODOLOGI**

#### **3.1 Umum**

Metodologi ini disusun agar penyelesaian permasalahan lebih terarah, sehingga hasil yang diperoleh merupakan hasil optimum sesuai dengan yang diharapkan. Alur penelitian dalam tesis ini dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.







**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

### **3.2 Persiapan Data**

Langkah awal pada pengerjaan tesis ini adalah pengambilan data-data dari sumber yang berkaitan dengan studi ini. Sumber-sumber referensi tersebut dapat berupa buku, jurnal, prociding, laporan penelitian atau hasil studi, maupun peraturan (*Code*) yang terkait.

### **3.3 Tinjauan Pustaka**

Setelah diperoleh data-data yang terkait, maka dilakukan tinjauan pustaka mengenai materi yang akan dibahas dalam tesis tersebut, terutama yang berkaitan dengan metode-metode analisis yang digunakan. Referensi utama yang diambil adalah jurnal yang isinya tentang hasil eksperimental kolom beton bertulang mutu tinggi di laboratorium beserta permodelannya.

### **3.4 Preliminary Design Model Spesimen Kolom**

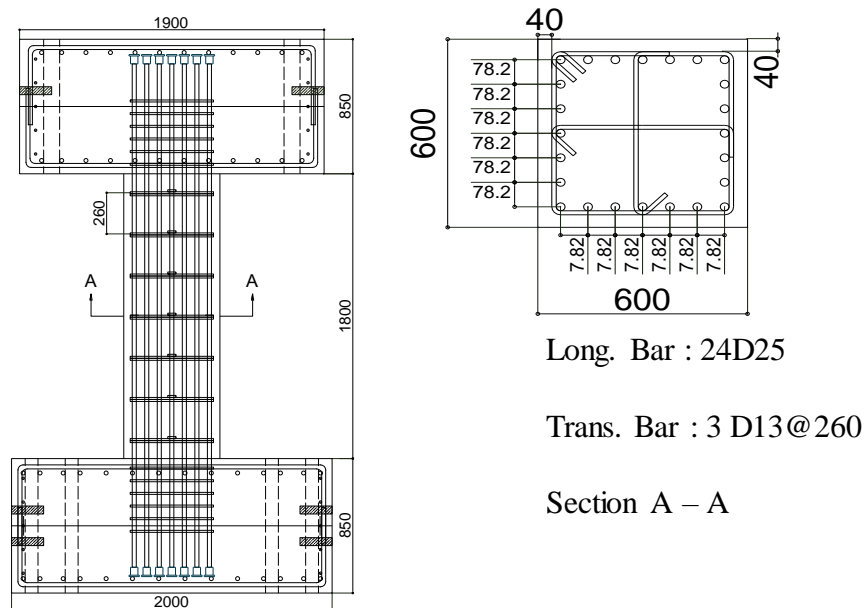
*Preliminary design* yang dilakukan mencakup data-data yang dibutuhkan dalam pemodelan kolom beton bertulang mutu tinggi, yaitu data geometri dan properti model kolom yang mencakup dimensi kolom, rasio beban aksial, mutu beton, mutu baja tulangan, maupun diameter tulangan yang digunakan dalam permodelan. Data tersebut didapatkan dari eksperimental yang telah dilakukan oleh Harun Alrasyid, 2015. Berikut adalah Tabel 3.1 yang menyajikan data desain spesimen kolom beton bertulang mutu tinggi beserta Gambar 3.2 s/d Gambar 3.4 yang menampilkan detail penulangan pada kolom beton bertulang mutu tinggi yang akan dimodelkan.

**Tabel 3.1** Desain Spesimen (Alrasyid 2015).

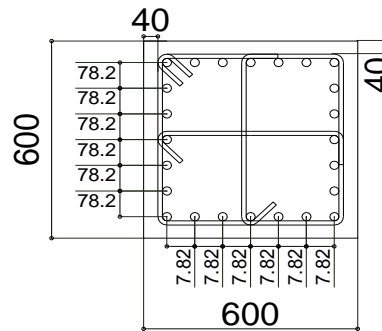
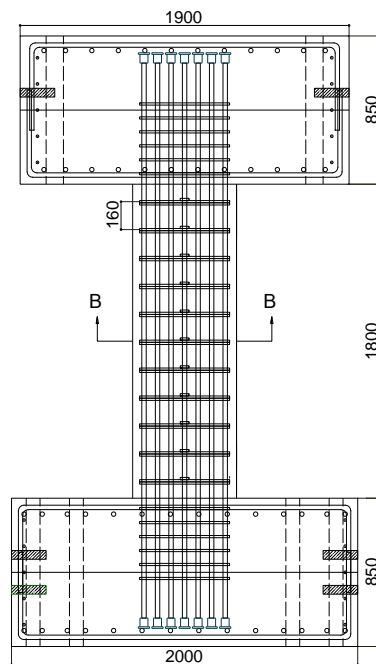
Kolom	Rasio		Tulangan Longitudinal		Tulangan Transversal		Ukuran	Beban
	Beban	$f'_{cs}$	SD 685		SD 785			Aksial
	Aksial	(Mpa)	$f_{yls}$	$\rho_t$	$f_{yts}$	$\rho_t$		Tekan
			(Mpa)	(%)	(Mpa)	(%)		(kN)
A-3.1	0.1	92.2				0.26	D-13-260	3319
A-6		90.8				0.59	D-13-150	3268
B-3.1		79.0				0.26	D-13-260	5616
B-5	0.2	78.0		3.38		0.41	D-13-160	5616
B-6		101.1	735	(24D25)	862	0.59	D-13-150	7272
C-5	0.3	79.6				0.41	D-13-160	8596
C-6		80.3				0.59	D-13-150	8672
D-5	0.4	82.8				0.41	D-13-160	11923
D-6		84.9				0.59	D-13-150	12225

$f'_{cs}$  :Spesifikasi kuat tekan beton;  $f_{yls}$  :Spesifikasi kuat leleh tulangan longitudinal

$f_{yts}$  :Spesifikasi kuat leleh tulangan geser



**Gambar 3.2** Penulangan dan Potongan Kolom Seri A-3.1, B-3.1 (Alrasyid 2015).

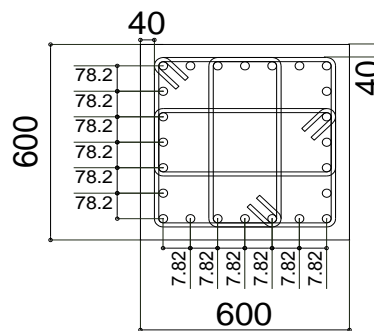
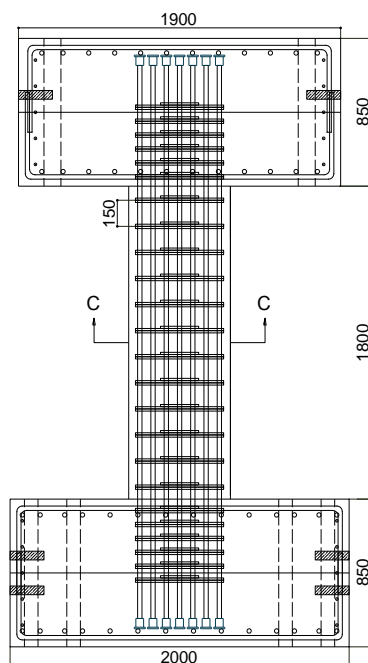


Long. Bar : 24D25

Trans. Bar : 3 D13@160

Section B – B

**Gambar 3.3** Penulangan dan Potongan Kolom B-5, C-5, D-5 (Alrasyid 2015).



Long. Bar : 24D25

Trans. Bar : 4 D13@150

Section C – C

**Gambar 3.4** Penulangan dan Potongan Kolom A-6, B-6, C-6, D-6 (Alrasyid 2015).

Terdapat 9 spesimen kolom beton bertulang mutu tinggi yang disajikan pada tabel 3.1 diatas, dengan beberapa parameter desain yang telah ditentukan beserta 3 gambar potongan kolom dengan ukuran 600x600 mm dan tinggi total 1800 mm yang terdapat pada gambar 3.2 s/d gambar 3.4. Semua kolom akan dipasang tulangan longitudinal D25 untuk baja tulangan mutu tinggi SD735 dan tulangan transversal D13 untuk baja tulangan mutu tinggi SD862.

Kolom tersebut diklasifikasikan menjadi 4 tingkatan rasio beban aksial ( $P/A_g f'_c$ ), 10% (kolom seri A) yakni spesimen kolom A-3.1 dan A-6, 20% (kolom seri B) yaitu untuk spesimen kolom B-3.1, B-5, dan B-6, 30% (kolom seri C) yakni untuk spesimen kolom C-5 dan C-6, serta 40% (kolom seri D), yaitu untuk spesimen kolom D-5 dan D-6. Sementara untuk rasio tulangan geser, dikelompokkan dalam 3 tingkatan yaitu 0.26%, 0.41% dan 0.59% dengan jarak spasi untuk masing-masing tulangan geser adalah 260 mm untuk spesimen kolom A-3.1 dan B-3.1, 160 mm untuk spesimen kolom B-5, C-5, dan D-5, dan jarak spasi 150 mm untuk spesimen kolom B-6, C-6, dan D-6.

Untuk data kuat tekan beton bervariasi antara spesimen kolom yang satu dengan spesimen kolom yang lain, yaitu dari 78.0 sampai dengan 101.1 MPa sebagaimana yang tersajikan dalam tabel 3.1. Ini merupakan hasil kuat tekan aktual rata-rata pada pengujian eksperimental yang telah dilakukan sebelumnya. Sehingga data kuat tekan beton tersebut akan digunakan sebagai salah satu input parameter pada program VecTor2 pada langkah selanjutnya.

### **3.5 Pemodelan Kolom Beton Bertulang Mutu Tinggi dengan Program VecTor2.**

Pada tahap ini, kolom beton bertulang mutu tinggi akan dimodelkan dengan menggunakan program VecTor2, yaitu dengan menginput data-data properti, geometri dan data lainnya sebagaimana yang tercantum dalam tabel 3.1 diatas.

Secara umum program yang berbasis metode *finite element* memiliki tiga tahapan utama, antara lain :

## 1. Pre-processing

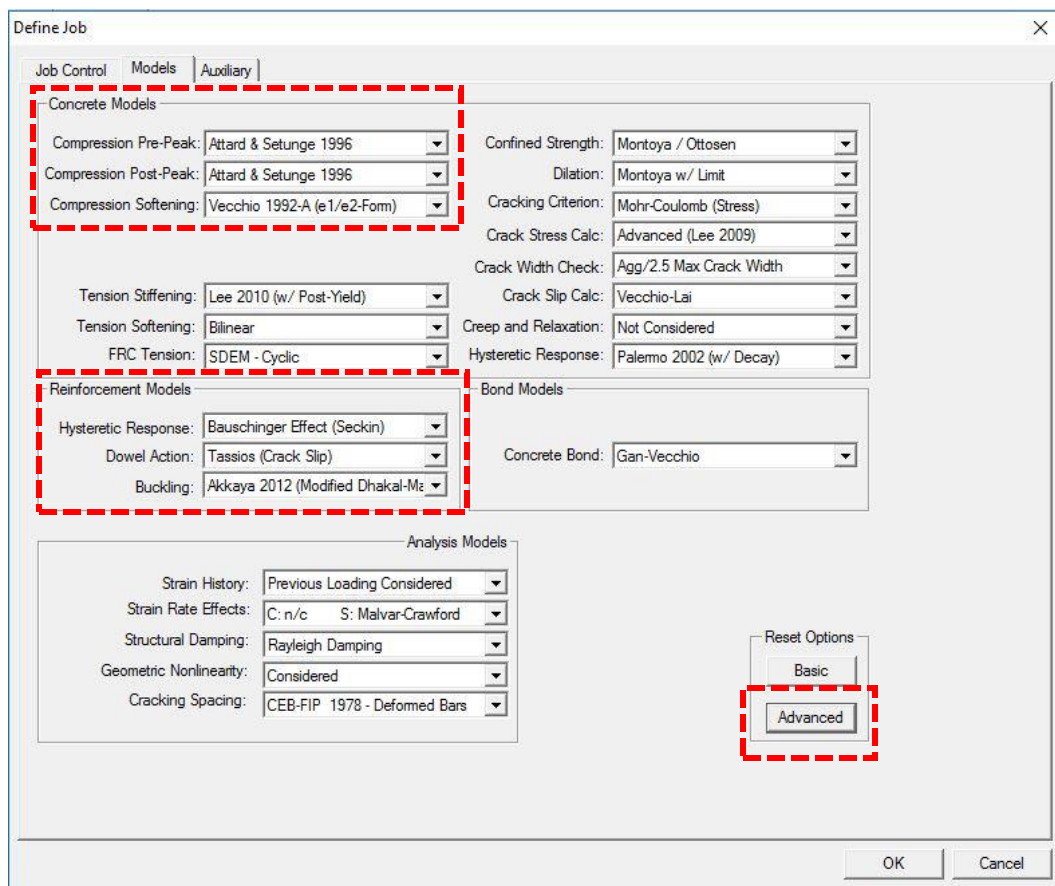
Merupakan tahapan *input* data material serta *modeling* berdasarkan model yang telah ditetapkan. Dalam VecTor2 untuk tahapan tersebut dibagi dalam beberapa urutan langkah yang harus dilakukan meliputi:

### a. Define Job

Langkah pertama dalam melakukan pemodelan menggunakan VecTor2 adalah dengan menentukan case dan model material yang digunakan pada pemodelan tersebut. Untuk case 1 adalah *displacement load* sedangkan case 2 merupakan *axial load*. Model material beton dan tulangan yang digunakan adalah model *Advanced* sebagaimana yang terdapat pada gambar 3.5 dan 3.6.

Activate	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Load file names	Case1	Case2	NULL	NULL	NULL
Load case title	Enter load case title	Enter load case title	Enter load case title	Enter load case title	Enter load case title
Initial factor	0	1	0	0	0
Final factor	108	1	0	0	0
Inc. factor	1	0	0	0	0
Load type	Monotonic	Monotonic	Monotonic	Monotonic	Monotonic
Repetitions	1	1	1	1	1
Cyclic Inc. factor	0	0	0	0	0
Initial Load Stage	1	1	1	1	1

Gambar 3.5 Input case pada VecTor2



**Gambar 3.6** Contoh Pemilihan Model Material pada VecTor2

### *b. Define Material Properties*

Terdapat dua tipe material yang digunakan pada pemodelan kolom beton bertulang mutu tinggi tersebut. Material 1 adalah material properties untuk blok beton, sementara material 2 adalah material properties untuk blok tulangan transversal. Input data material properties pada tahap ini diambil dari data hasil uji eksperimental yang telah dilakukan sebelumnya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.7 dan 3.8.



Define Material Properties

Material Types

Type:

Material 1

Material 2

Add

Update

Delete

Reinforcement Components

Component:

Add

Update

Delete

Material Properties

Reference Type: Reinforced Concrete

Thickness, T: 600 mm

Cylinder Compressive Strength,  $f'_c$ : 92.2 MPa

Tensile Strength,  $f_t$ : \* 3.169 MPa

Initial Tangent Elastic Modulus,  $E_c$ : \* 52811.46 MPa

Cylinder Strain at  $f'_c$ ,  $\epsilon_{oc}$ : \* 2.492 me

Poisson's Ratio,  $\mu$ : \* 0.2

Thermal Expansion Coefficient,  $C_c$ : \* 1e-005 /°C

Maximum Aggregate Size,  $a$ : \* 30 mm

Density: \* 2400 kg/m<sup>3</sup>

Thermal Diffusivity,  $K_c$ : \* 1.2 mm<sup>2</sup>/s

Maximum Crack Spacing...

perpendicular to x-reinforcement,  $S_x$ : \* 1000 mm

perpendicular to y-reinforcement,  $S_y$ : \* 1000 mm

Color

Smeared Reinforcement Properties

Reference Type: Ductile Steel Reinforcement

Fibre Type:

Out of Plane Reinforcement: ☐

Reinforcement Direction from X-Axis: 0 °

Reinforcement Ratio,  $\rho$ : 0.255254 %

Reinforcement Diameter,  $D_b$ : 13 mm

Yield Strength,  $F_y$ : 862 MPa

Ultimate Strength,  $F_u$ : 1021 MPa

Elastic Modulus,  $E_s$ : 200000 MPa

Strain Hardening Strain,  $\epsilon_{sh}$ : 21.6 me

Ultimate Strain,  $\epsilon_u$ : 150 me

Thermal Expansion Coefficient,  $C_s$ : \* 0 /°C

Prestrain,  $\Delta\epsilon_p$ : 0 me

Unsupported Length Ratio,  $b/t$ : 0

Material types to be used for rectangular, quadrilateral and triangular elements only. \* Enter '0' for VT2 default value.

OK Cancel

**Gambar 3.7** Input material 1 (blok beton) pada VecTor2

Define Material Properties

Material Types

Type:

Material 1

Material 2

Add

Update

Delete

Reinforcement Components

Component:

Reinforcement 1

Add

Update

Delete

Material Properties

Reference Type: Reinforced Concrete

Thickness, T: 600 mm

Cylinder Compressive Strength,  $f'_c$ : 92.2 MPa

Tensile Strength,  $f_t$ : \* 3.169 MPa

Initial Tangent Elastic Modulus,  $E_c$ : \* 52811.46 MPa

Cylinder Strain at  $f'_c$ ,  $\epsilon_{oc}$ : \* 2.492 me

Poisson's Ratio,  $\mu$ : \* 0.2

Thermal Expansion Coefficient,  $C_c$ : \* 1e-005 /°C

Maximum Aggregate Size,  $a$ : \* 30 mm

Density: \* 2400 kg/m<sup>3</sup>

Thermal Diffusivity,  $K_c$ : \* 1.2 mm<sup>2</sup>/s

Maximum Crack Spacing...

perpendicular to x-reinforcement,  $S_x$ : \* 1000 mm

perpendicular to y-reinforcement,  $S_y$ : \* 1000 mm

Color

Smeared Reinforcement Properties

Reference Type: Ductile Steel Reinforcement

Fibre Type:

Out of Plane Reinforcement: ☐

Reinforcement Direction from X-Axis: 0 °

Reinforcement Ratio,  $\rho$ : 0.255254 %

Reinforcement Diameter,  $D_b$ : 13 mm

Yield Strength,  $F_y$ : 862 MPa

Ultimate Strength,  $F_u$ : 1021 MPa

Elastic Modulus,  $E_s$ : 200000 MPa

Strain Hardening Strain,  $\epsilon_{sh}$ : 21.6 me

Ultimate Strain,  $\epsilon_u$ : 150 me

Thermal Expansion Coefficient,  $C_s$ : \* 0 /°C

Prestrain,  $\Delta\epsilon_p$ : 0 me

Unsupported Length Ratio,  $b/t$ : 0

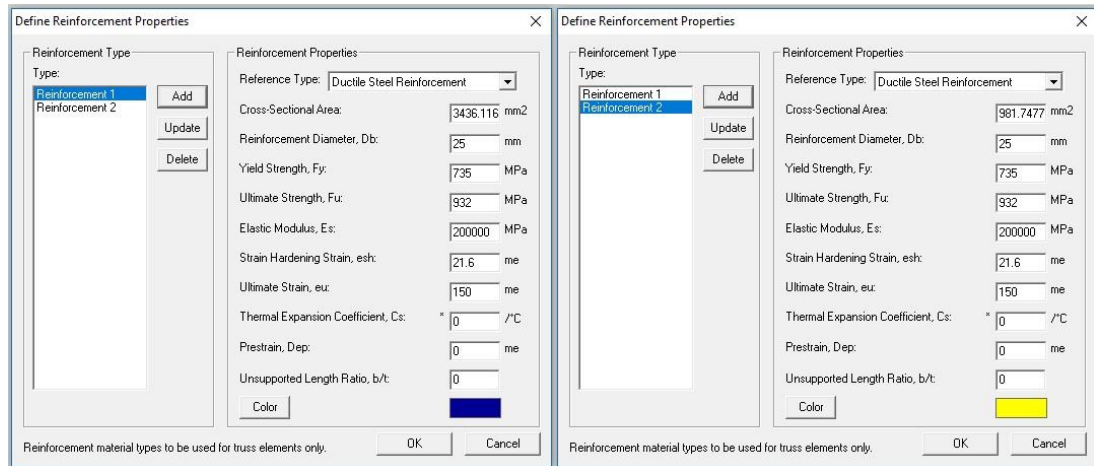
Material types to be used for rectangular, quadrilateral and triangular elements only. \* Enter '0' for VT2 default value.

OK Cancel

**Gambar 3.8** Input material 2 (blok tulangan transversal) pada VecTor2

### c. Define Reinforcement Properties

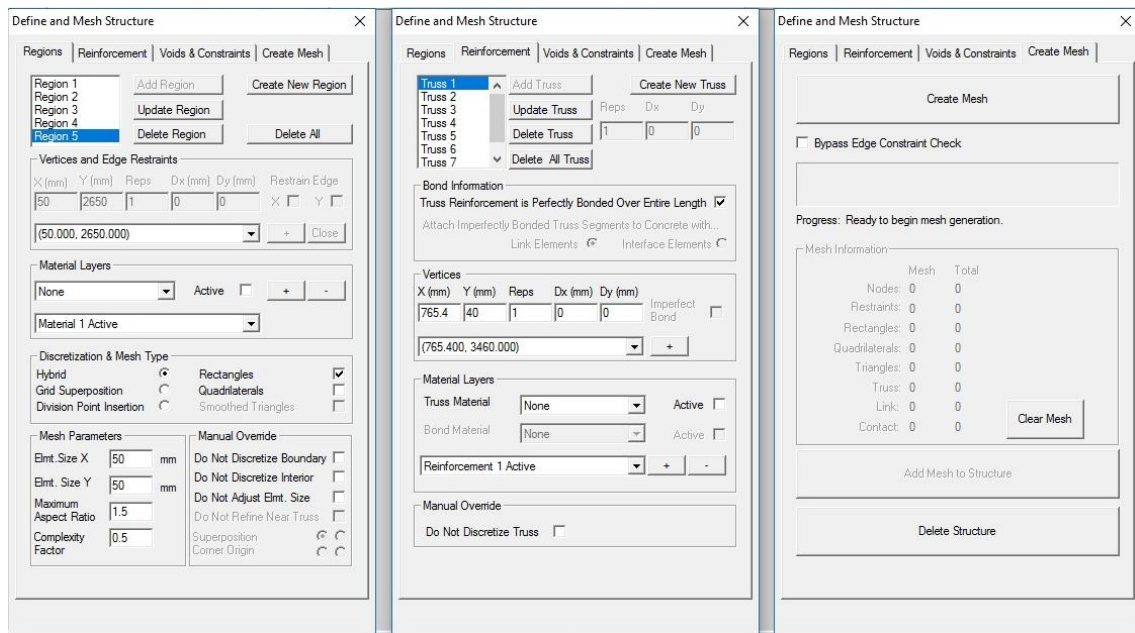
Pada tahap ini, akan diinput properti tulangan longitudinal sesuai dengan jumlah kaki yang terdapat pada desain spesimen untuk masing-masing kolom. Berikut adalah contoh input properti tulangan longitudinal pada VecTor2.



**Gambar 3.9** Input properti tulangan longitudinal pada VecTor2

### d. Define and Mesh Structure

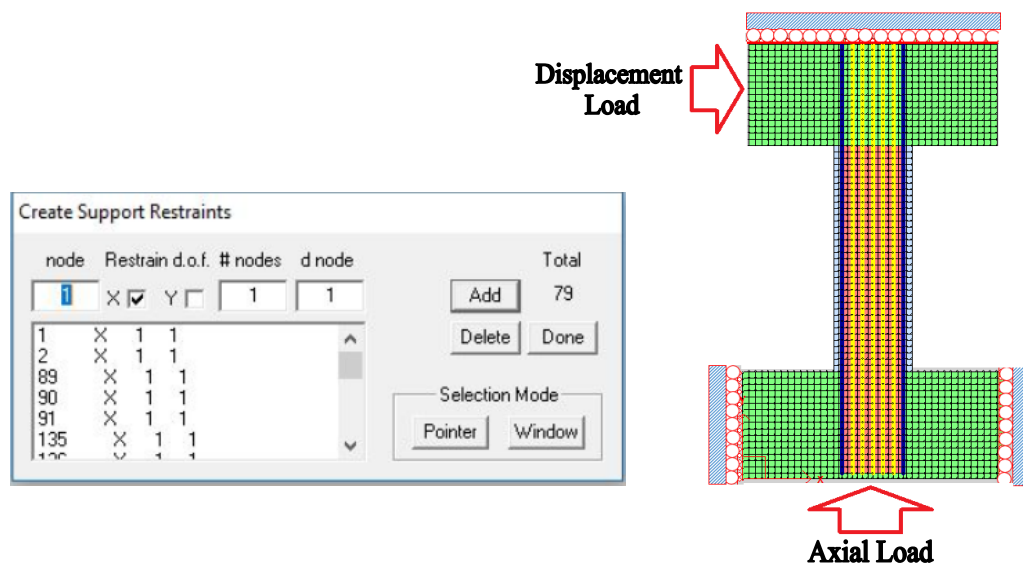
*Define and Mesh Structure* merupakan tahapan dimana semua spesimen kolom akan digambarkan dalam model 2 Dimensi (2D), kemudian semua elemen struktur yang telah digambarkan melalui koordinat X dan Y, akan diberikan *meshing* yang bertujuan untuk membagi setiap elemen tersebut kedalam potongan-potongan yang lebih kecil sehingga dapat dianalisis dengan VecTor2. Agar hasil analisa lebih teliti, maka setiap elemen diberikan jarak *meshing* sebesar 50 mm. Hal ini dapat dilihat pada gambar 3.10.



**Gambar 3.10** Input data pada kotak dialog *define and mesh structure* VecTor2

*e. Create Support Restrain*

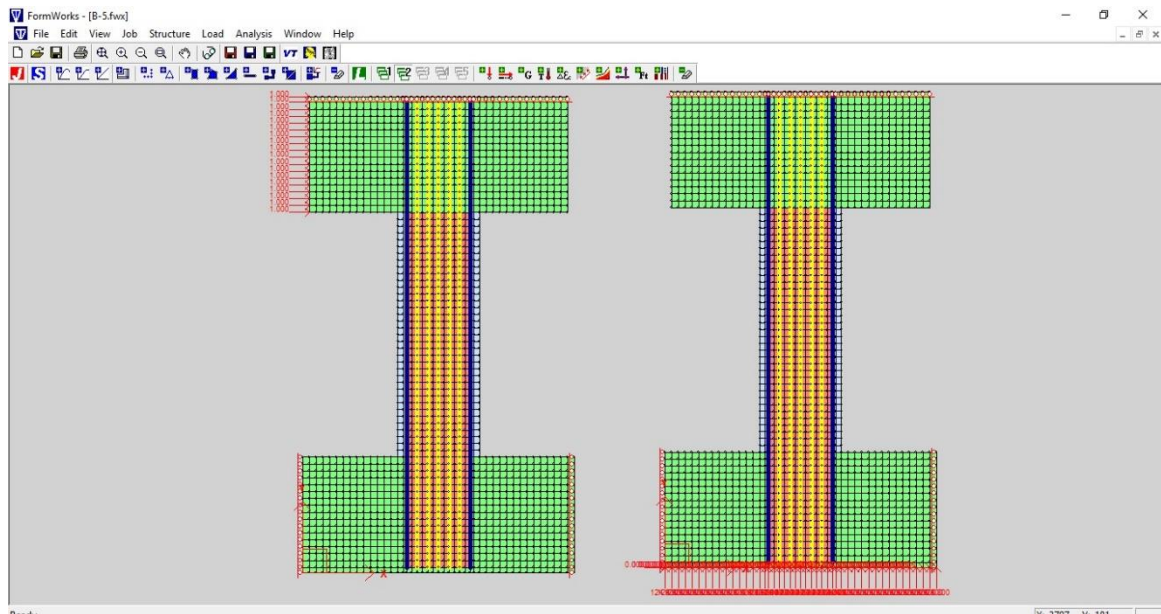
Setelah dilakukan Meshing pada elemen kolom, maka langkah selanjutnya adalah penempatan perletakan pada model kolom beton bertulang mutu tinggi. Seperti yang terlihat pada gambar 3.11 bahwa pemberian perletakan pada model ini adalah perletakan rol pada sisi kiri-kanan kolom bagian bawah, dan pada ujung kolom bagian atas diberikan juga perletakan rol untuk menerima beban displacement pada arah lateral.



**Gambar 3.11** Support Restrain pada Model Kolom

#### *f. Apply Loads*

Ini merupakan langkah akhir dari tahapan *Pre-processing* VecTor2. Dalam tahap ini, akan diberikan beban displacement dan beban aksial tekan pada model spesimen kolom. Untuk pembebanan, digunakan kombinasi beban aksial tekan dan beban monotonik. Besarnya beban aksial tekan dapat dilihat pada Tabel 3.1 diatas, sementara untuk beban monotonik diberikan sebesar 6% dari drift yang terjadi, yaitu sekitar 108 mm.



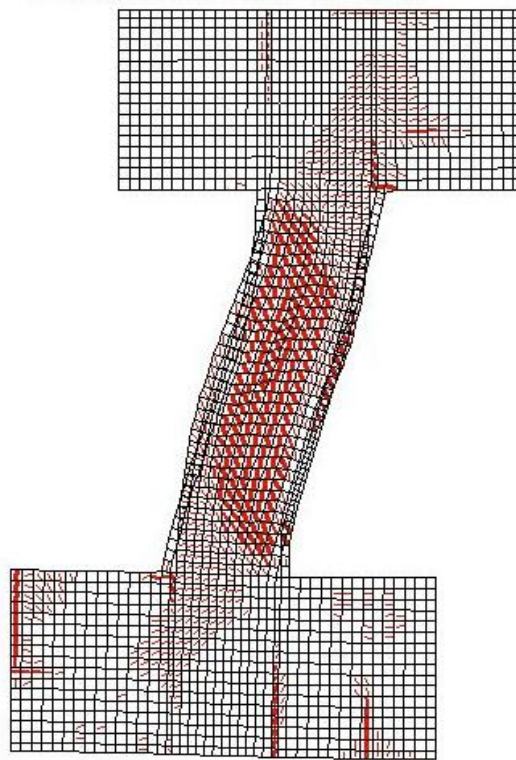
**Gambar 3.12** Beban Displacement dan Beban Aksial Tekan

#### *2. Analysis*

Setelah seluruh prosedur *modeling* selesai dibuat, selanjutnya adalah running model dengan bantuan tool *Run VecTo2 Processor*.

#### *3. Post-processing*

Pada tahapan ini akan dihasilkan output running dari VecTor2 yang terdiri dari besarnya perpindahan yang terjadi, pola retak pada kolom, tegangan regangan yang terjadi, sudut retak kolom, dan berbagai parameter lainnya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.13, yang menunjukkan pola retak yang terjadi pada kolom beton bertulang mutu tinggi.



**Gambar 3.13** Pola Retak pada Model Spesimen Kolom

### 3.6 Analisa Hasil Pemodelan

Dari hasil running model pada program VecTor2 maka akan diperoleh output program berupa gaya geser, perpindahan, pola retak dan sudut retak. Sehingga hasil output tersebut akan dianalisis dengan melakukan perbandingan terhadap hasil eksperimental,

$$\frac{V_{\text{aktual}}}{V_{\text{FEM}}} \quad \text{dan} \quad \frac{\Delta_{\text{aktual}}}{\Delta_{\text{FEM}}} \quad 3.1$$

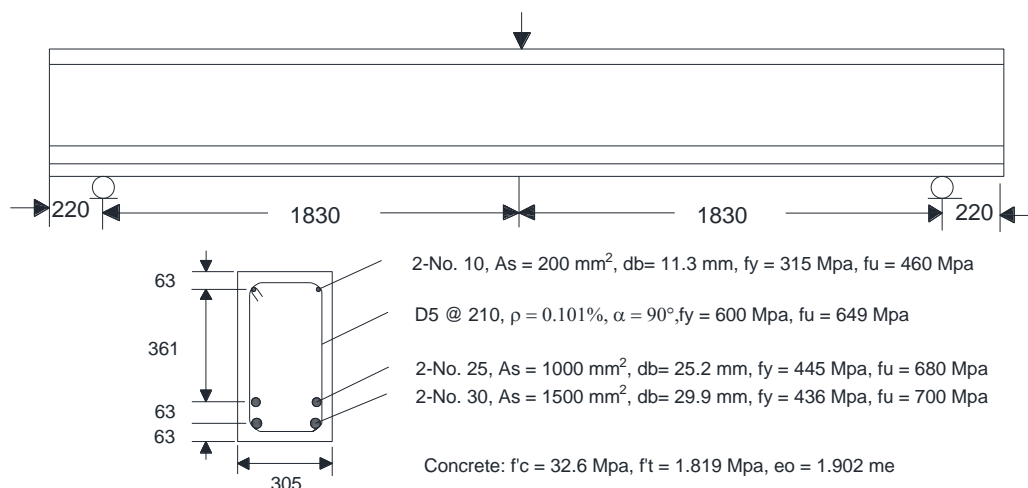
dimana,  $V_{\text{aktual}}$  = Geser yang terjadi pada saat uji eksperimental (hasil penelitian)

$\Delta_{\text{aktual}}$  = Perpindahan yang terjadi pada saat kolom runtuh (hasil penelitian)

### 3.7 Validasi Hasil

Selanjutnya, setelah dilakukan analisa terhadap hasil pemodelan, akan dilakukan validasi antara hasil pemodelan dengan program dan hasil eksperimental yang telah dilakukan oleh Harun Alrasyid pada tahun 2015 dengan judul “*Seismic Shear Behavior of High-Strength Reinforced Concrete Columns*” yang berupa gaya geser, perpindahan, dan tegangan-regangan sesuai dengan standar ketentuan yang digunakan dalam ACI 318–14 (2014).

Sebagai contoh, berikut salah satu hasil pemodelan dengan VecTor2 yang kemudian di validasikan dengan hasil eksperimental oleh Shim (2002) pada balok sederhana dengan spesifikasi sebagai berikut :



**Gambar 3.14** Detail Spesifikasi Balok Uji

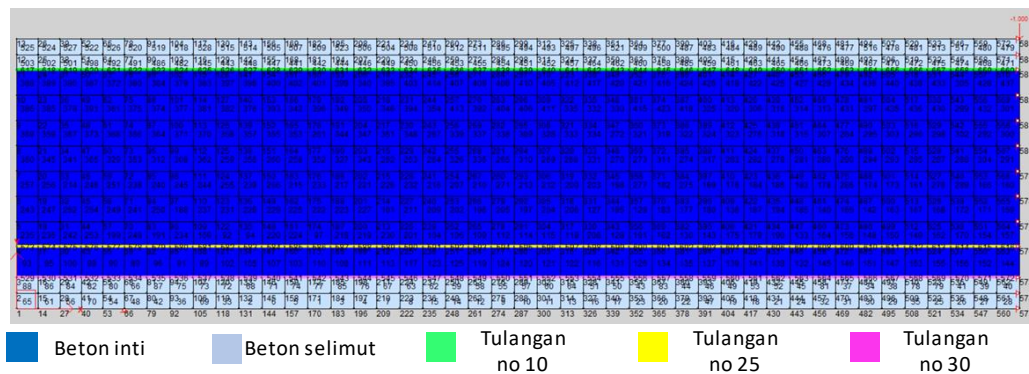
Penelitian yang dilakukan dengan memberikan beban pada bagian tengah bentang balok dengan kondisi balok yang simetris. Pada eksperimental yang dilakukan Shim (2002) mendapatkan beban ultimate sebesar 450 kN dan defleksi sebesar 17 mm.

Seperti telah diketahui sebelumnya bahwa balok yang diuji merupakan balok simetris maka untuk pemodelan dengan VecTor2 hanya menggunakan sebagian bentang saja yang dianggap dapat mewakili perilaku balok secara keseluruhan. Tujuan pemodelan ini untuk meninjau beban ultimate dan defleksi yang terjadi. Pemodelan kemudian dengan menggunakan *rectangular elements* dengan 2 tipe



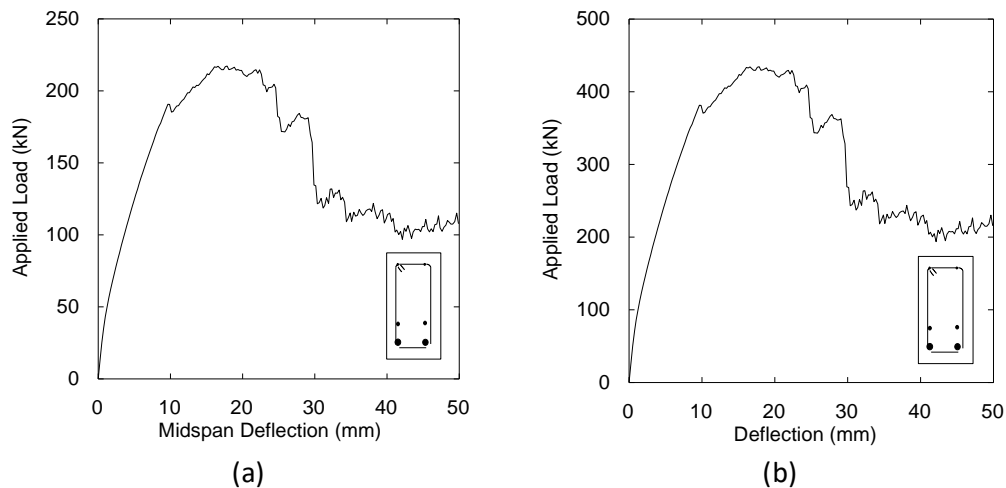
material beton yaitu beton pada selimut dan beton pada inti beton. Juga digunakan 3 tipe tulangan longitudinal sesuai dengan spesifikasi balok.

Perletakan pada balok diletakkan pada bagian bawah balok dengan jarak 220 mm dari kiri balok sedangkan pada bagian tengah balok karena hanya menggunakan setengah balok maka dilakukan restriction berupa sendi roll dengan kondisi tidak bergerak arah x (horizontal) tetapi boleh bergerak arah y (vertikal). Beban nodal berupa support displacement diberikan pada tengah bentang balok kearah bawah (sumbu y negatif). Beban ini kemudian akan dimulai dari 0 sampai beban sebesar 50 dengan peningkatan sebesar 0.25 sehingga ada 201 step yang terjadi. Modeling dengan menggunakan program VecTor2 dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



**Gambar 3.15** Permodelan struktur balok dalam VecTor2

Setelah modeling dilakukan maka program dijalankan. Kemudian didapatkan hasil sebagai berikut :



**Gambar 3.16** Hubungan applied load terhadap defleksi (a) kondisi permodelan setengah bentang (b) kondisi permodelan struktur keseluruhan

Dari grafik (a) diatas didapatkan beban ultimate sebesar 217,3 kN dengan defleksi sebesar 17,846 mm. Perlu diketahui bahwa beban ultimate yang terjadi hanya untuk satu perletakan saja jadi untuk total balok terdapat 2 perletakan maka untuk beban ultimate dikali 2 sehingga didapatkan grafik (b) seperti pada gambar diatas.

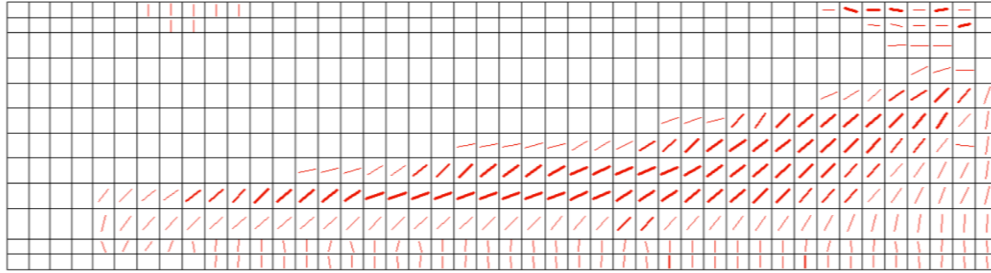
Dari grafik (b) diatas didapatkan beban ultimate sebesar 434,6 kN dengan defleksi sebesar 17,846 mm. Hasil yang didapatkan ternyata cukup mendekati hasil eksperimental yang dapat dilihat pada tabel berikut :

**Tabel 3.2** Hasil Validasi Eksperimental dan VecTor2

	Eksperimental	VecTor 2	Eksp/FEM
Ultimate Load	450 kN	434,6 kN	1.035
Deflection	17 mm	17,846 mm	0.95

Sehingga dapat dikatakan program Vector 2 sudah tervalidasi. Hasil output lainnya berupa pola retak dapat dilihat pada gambar berikut :





**Gambar 3.17** Gambar distribusi pola retak yang terjadi pada balok

### 3.8 Kesimpulan

Setelah dilakukan analisa serta validasi hasil pemodelan terhadap hasil eksperimental, maka dapat ditarik kesimpulan secara keseluruhan dari studi yang telah dilakukan tersebut.

## **BAB IV**

### **ANALISA DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1. Umum**

Pada bab ini akan disajikan hasil pemodelan kolom beton bertulang mutu tinggi berupa kurva gaya perpindahan, pola retak pada kolom, maupun sudut retak yang terjadi pada kolom akibat kombinasi beban monotonik dan beban aksial tekan dengan menggunakan program bantu *finite element* VecTor2. Hasil analisis VecTor2 dari 9 model spesimen kolom tersebut akan dibandingkan dengan hasil ekperimental.

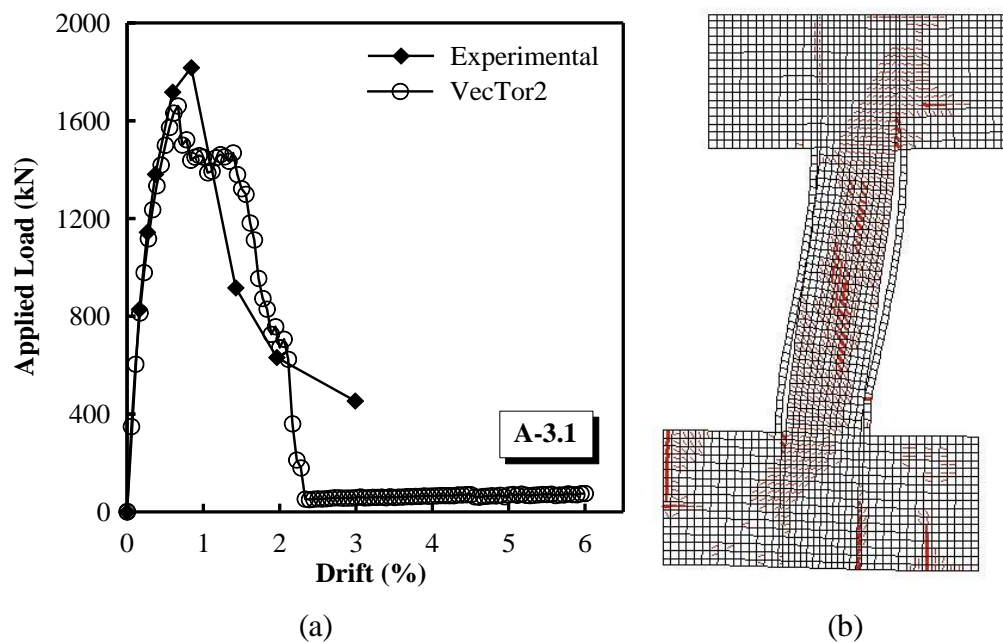
#### **4.2. Kurva Gaya-Perpindahan**

##### **4.2.1. 0.1 Rasio Beban Aksial Kolom**

###### *4.2.1.1. Spesimen Kolom A-3.1*

Gambar 4.1(a) menunjukkan perbandingan grafik hubungan antara beban dengan perpindahan yang terjadi pada kolom A-3.1 setelah dimodelkan dengan software *finite element* VecTor2.

Spesimen kolom A-3.1 di desain dengan kuat tekan aktual beton sebesar 92.2 MPa, rasio tulangan transversal 0.26 % dengan jarak spasi 260 mm dan diberikan beban aksial tekan sebesar 3319 kN. Dari hasil analisa VecTor2 dapat dilihat pada grafik yang terdapat pada Gambar 4.1 bahwa kolom mencapai puncak penerapan beban sebesar 1661 kN pada drift 0.67 %. Sementara pada hasil eksperimental untuk spesimen yang sama, kolom mencapai puncak pengaplikasian beban sebesar 1817 kN pada drift 1 %. Pola retak yang terbentuk pada kolom tersebut pada awalnya ditunjukkan dengan adanya retak lentur yang terjadi pada ujung kolom bagian bawah dan ujung kolom bagian atas. Kemudian retak tersebut semakin merambat pada badan kolom ketika beban displacementnya semakin ditingkatkan. Pola retak kolom A-3.1 dapat dilihat pada gambar 4.1(b).

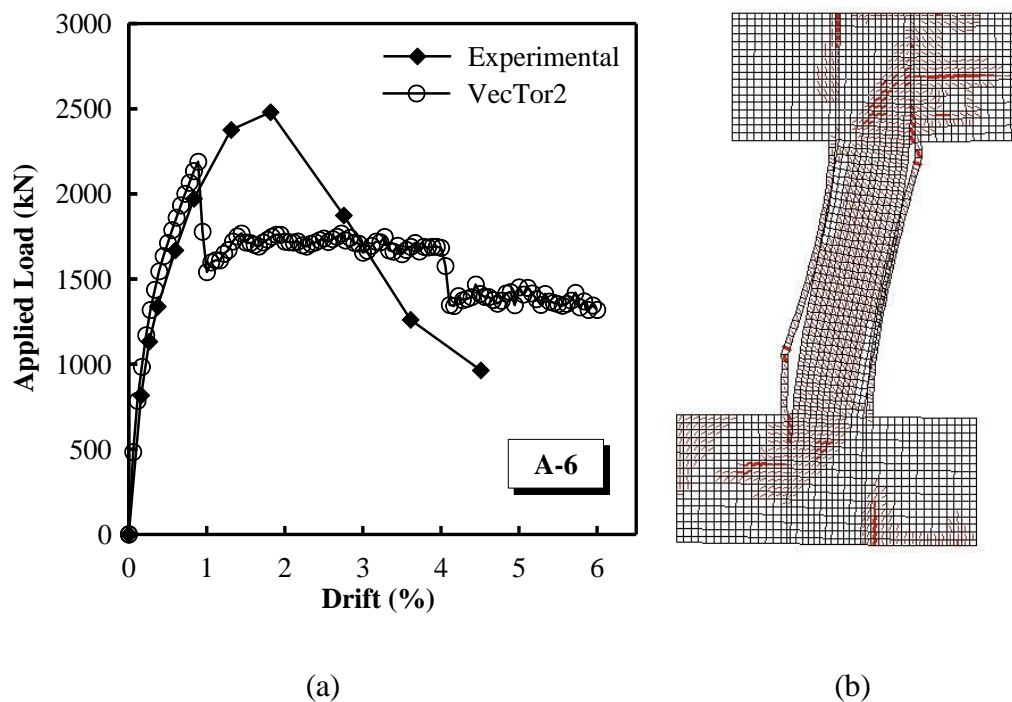


**Gambar 4.1** (a) Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom A-3.1 ; (b) Pola keruntuhan kolom A-3.1 pada beban puncak

#### 4.2.1.2. Spesimen Kolom A-6

Untuk spesimen A-6 pada grafik yang terdapat pada Gambar 4.2(a), hasil pemodelan dengan VecTor2 menunjukkan bahwa kolom tersebut mencapai puncak penerapan beban pada drift 0.89 % sebesar 2134 kN, yang mana spesimen kolom A-6 tersebut di desain dengan menggunakan rasio tulangan transversal 0.59 % dengan jarak spasi tulangan geser 150 mm, beban aksial yang diberikan sebesar 3268 kN dan kuat tekan aktual sebesar 90.8 MPa. Hal ini sedikit berbeda dengan spesimen koloom A-6 pada hasil eksperimental. Dimana pada hasil eksperimental, kolom A-6 mencapai puncak aplikasi beban pada drift 2 % sebesar 2480 kN.

Pola keruntuhan kolom tersebut hampir sama dengan yang terjadi pada spesimen kolom A-3.1. Dapat dilihat pada Gambar 4.2(b) dimana pada awalnya terdapat retak lentur yang terbentuk pada ujung atas dan ujung bawah kolom, kemudian lama-kelamaan ketika semakin maningkat nilai beban displacementnya, retak yang terjadi semakin menyebar ke daerah badan kolom hingga pada akhirnya menyebabkan hancurnya selimut beton.



**Gambar 4.2** (a) Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom A-6 ; (b) Pola keruntuhan kolom A-6 pada beban puncak

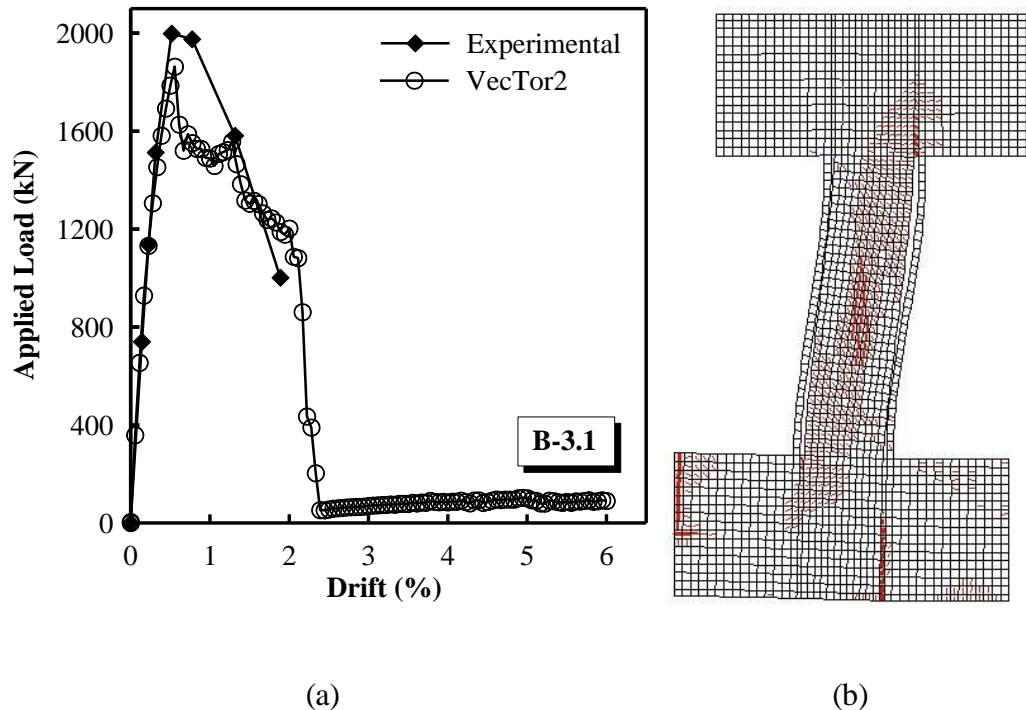
#### 4.2.2. 0.2 Rasio Beban Aksial Kolom

Pada Gambar 4.3(b), 4.4(b), dan Gambar 4.5(b), menunjukkan perilaku kerusakan yang terjadi pada pada spesimen kolom B-3.1, kolom B-5, dan kolom B-6. Semakin bertambahnya nilai beban displacement, maka retak yang terjadi pada daerah ujung atas dan ujung bawah dari kolom tersebut semakin merambat ke bagian tengah kolom. Secara keseluruhan, ke tiga spesimen kolom tersebut menunjukkan retak lentur pada awal beban bekerja dan kemudian lama-kelamaan mengalami retak geser pada badan kolom, sehingga pada akhirnya ketika mencapai beban puncak beban ultimit, ke tiga spesimen kolom tersebut mengalami kehancuran pada selimut betonnya.

##### 4.2.2.1. Spesimen Kolom B-3.1

Spesimen Kolom B-3.1 adalah salah satu kolom dengan rasio beban aksial 0.2. Kolom tersebut dimodelkan dengan kuat tekan aktual beton sebesar 79.0 MPa, rasio tulangan transversal 0.26 %, jarak spasi tulangan 260 mm, dan beban aksial

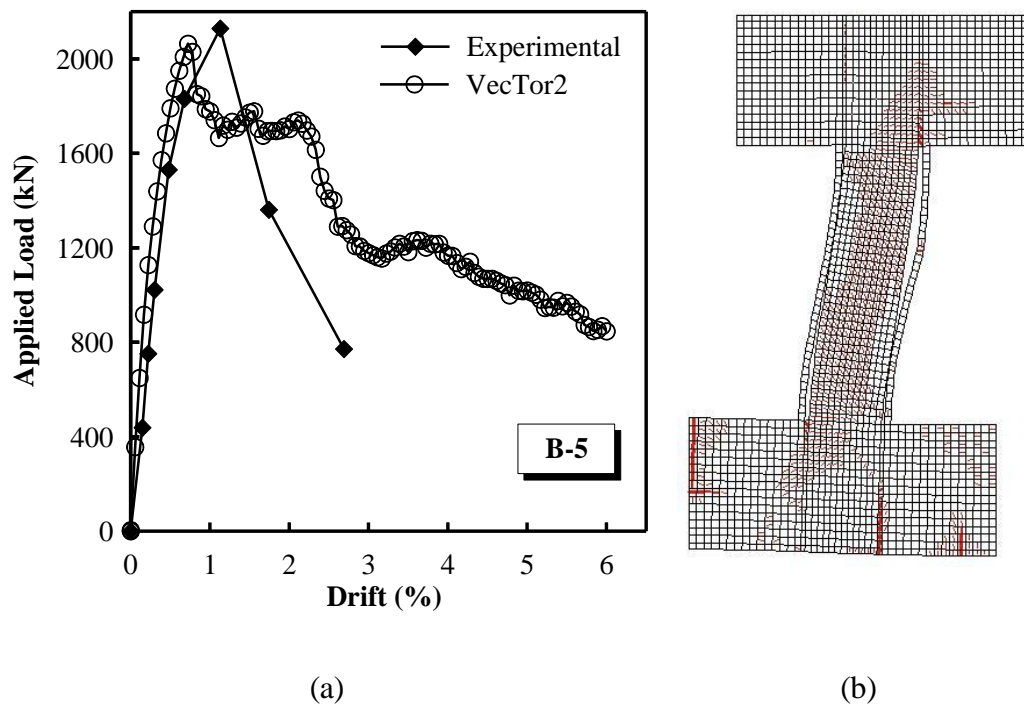
tekan yang diberikan sebesar 5616 kN. Hasil pemodelan VecTor2 seperti yang terlihat pada Gambar 4.3(a) menunjukkan bahwa kolom B-3.1 mencapai puncak beban yang diterapkan sebesar 1863 kN pada drift 0.60 %, sementara untuk hasil eksperimen pada kolom B-3.1 terlihat bahwa kolom tersebut mencapai beban puncak pada drift 0.75 % yaitu sebesar 1999 kN.



**Gambar 4.3** (a) Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom B-3.1 ; (b) Pola keruntuhan kolom B-3.1 pada beban puncak

#### 4.2.2.2. Spesimen Kolom B-5

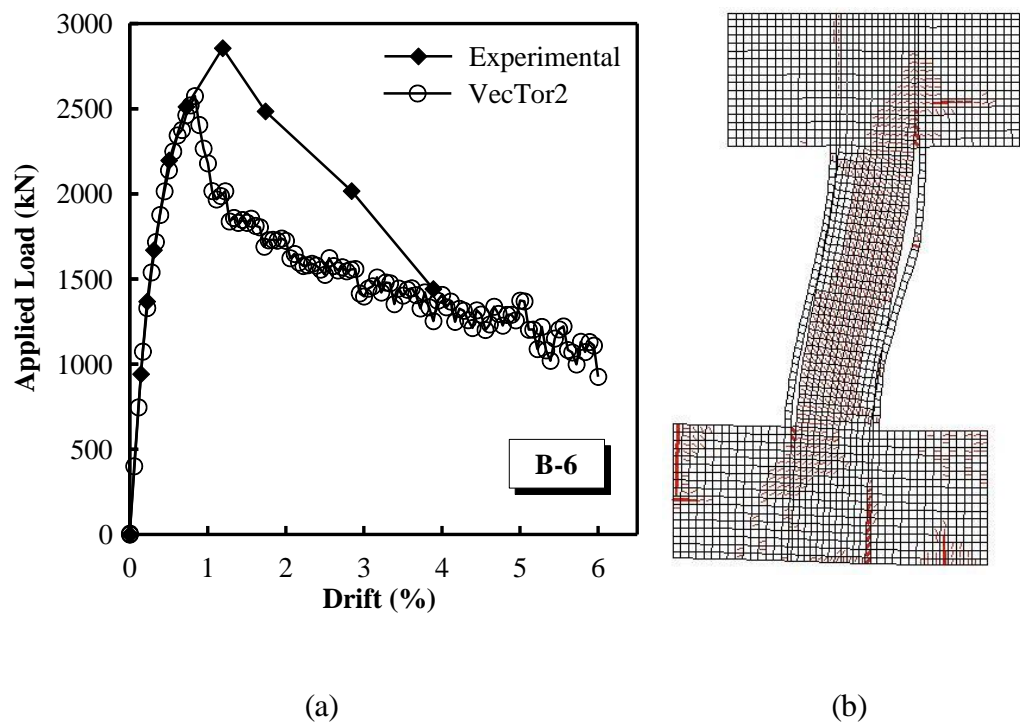
Kolom B-5 di desain dengan rasio tulangan transversal 0.41 %, jarak spasi tulangan 160 mm, kuat tekan aktual beton 78.0 MPa, dan diberikan beban aksial tekan sebesar 5616 kN. Dari grafik pada Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa kolom tersebut mencapai puncak pemberian beban aksial sebesar 2064 kN pada drift 0.75 %. Sementara pada hasil eksperimentalnya, kolom B-5 mencapai puncak beban ultimit pada drift 1 % sebesar 2129 kN.



**Gambar 4.4** (a) Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom B-5 ; (b) Pola keruntuhan kolom B-5 pada beban puncak

#### 4.2.2.3. Spesimen Kolom B-6

Pada kolom B-6, rasio tulangan transversal di desain sebesar 0.59 % dengan jarak spasi tulangan transversal 150 mm. Kuat tekan aktual beton sebesar 101.1 MPa dan beban tekan aksial sebesar 7272 kN. Dari hasil pemodelan VecTor2 pada Gambar 4.5 untuk spesimen B-6, dapat dilihat bahwa puncak penerapan beban aksial pada kolom tersebut sebesar 2575 kN pada drift 0.83 %, sedangkan pada hasil eksperimentalnya terlihat bahwa puncak aplikasi beban aksial pada kolom B-6 sebesar 2856 kN pada drift 1.5 %.



**Gambar 4.5** (a) Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom B-6 ; (b) Pola keruntuhan kolom B-6 pada beban puncak

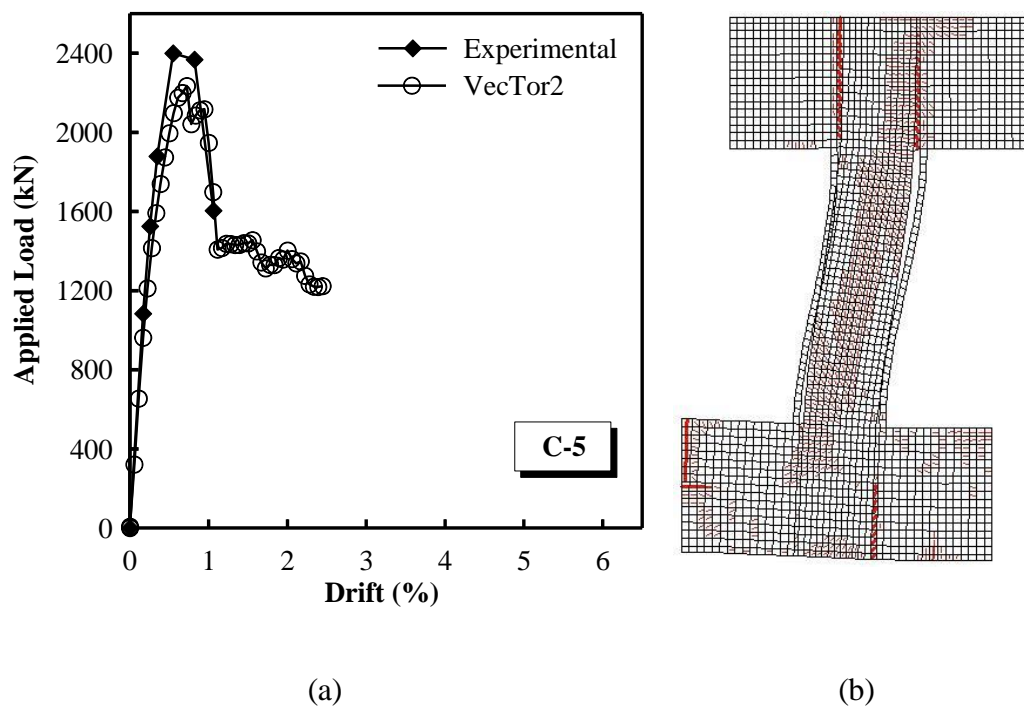
#### 4.2.3. 0.3 Rasio Beban Aksial Kolom

Pola keruntuhan yang ditunjukkan pada spesimen kolom dengan rasio beban aksial 0.3 sedikit berbeda dengan yang terjadi pada kolom dengan rasio beban aksial 0.1 dan 0.2. Pada saat pengamatan yang dilakukan ketika proses running VecTor2 terhadap kolom C-5 dan kolom C-6, dapat diketahui bahwa kedua kolom tersebut tidak menunjukkan tanda retak lentur pada awal beban bekerja, namun ketika mencapai beban ultimitnya, retak awal yang terjadi pada ujung atas dan bawah kolom mulai meningkat hingga mencapai badan kolom. Sehingga terlihat adanya kehancuran pada selimut beton dari kedua model kolom tersebut.

##### 4.2.3.1. Spesimen Kolom C-5

Spesimen kolom C-5 di modelkan menggunakan kuat tekan aktual beton 79.0 MPa. Rasio tulangan transversal, jarak spasi tulangan, dan puncak penerapan beban

aksial masing-masing sebesar 0.41 %, 160 mm, dan 8596 kN. Dari hasil pemodelan VecTor2 yang ditampilkan pada Gambar 4.6, dapat dilihat bahwa kolom C-5 untuk hasil pemodelan VecTor2 dan hasil eksperimental mencapai puncak pengaplikasian beban pada drift yang sama, yaitu 0.75 %, dengan masing-masing puncak beban aksial yang diterapkan sebesar 2234 kN dan 2399 kN.



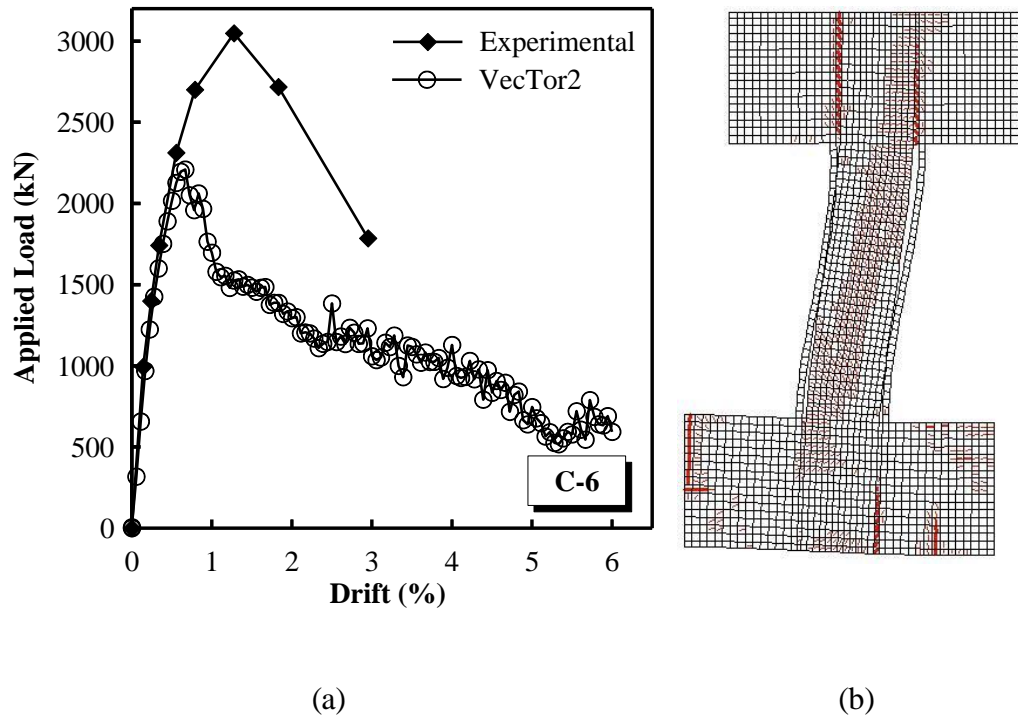
**Gambar 4.6** (a) Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom C-5 ; (b) Pola keruntuhan kolom C-5 pada beban puncak

#### 4.2.3.2. Spesimen Kolom C-6

Untuk spesimen kolom C-6 dimodelkan dengan kuat tekan aktual beton sebesar 80.3 Mpa, rasio tulangan transversal sebesar 0.59 % dengan jarak spasi tulangan transversal 150 mm dan beban aksial tekan sebesar 8672 kN. Dari hasil pemodelan VecTor2 pada Gambar 4.7 spesimen C-6, dapat dilihat bahwa puncak penerapan beban aksial pada kolom tersebut sebesar 2209 kN pada drift 0.67 %, dan



sementara pada hasil eksperimentalnya terlihat bahwa puncak aplikasi beban aksial pada kolom sebesar 3048 kN pada drift 1.5 %.

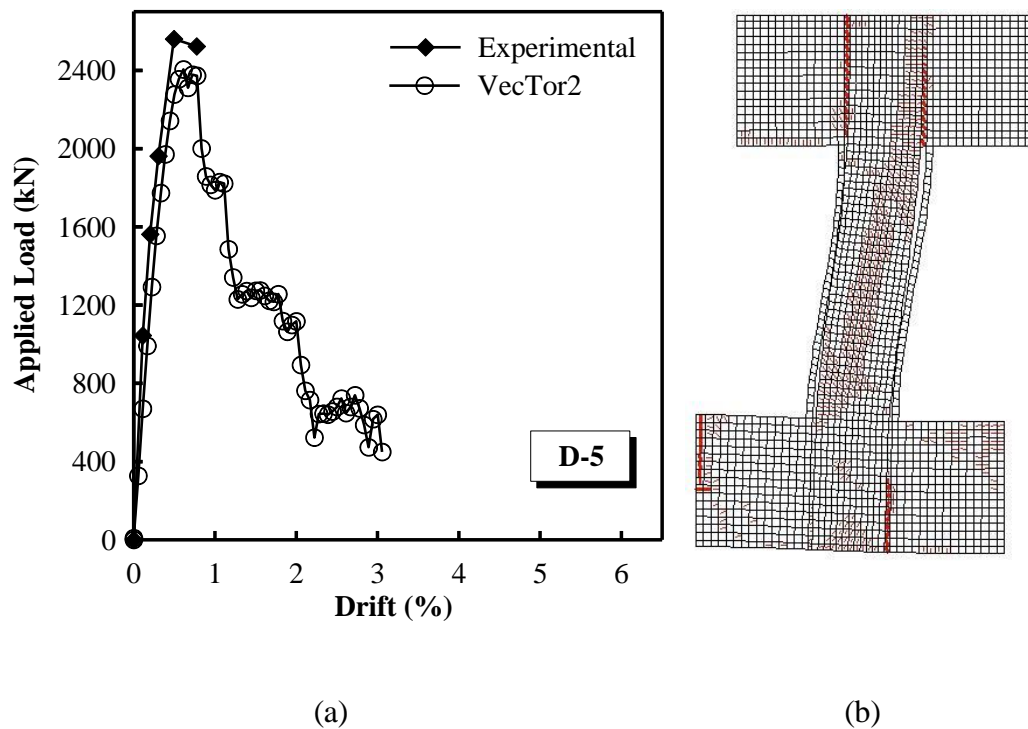


**Gambar 4.7** (a) Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom C-6 ; (b) Pola keruntuhan kolom C-6 pada beban puncak

#### 4.2.4. 0.4 Rasio Beban Aksial Kolom

##### 4.2.4.1. Spesimen Kolom D-5

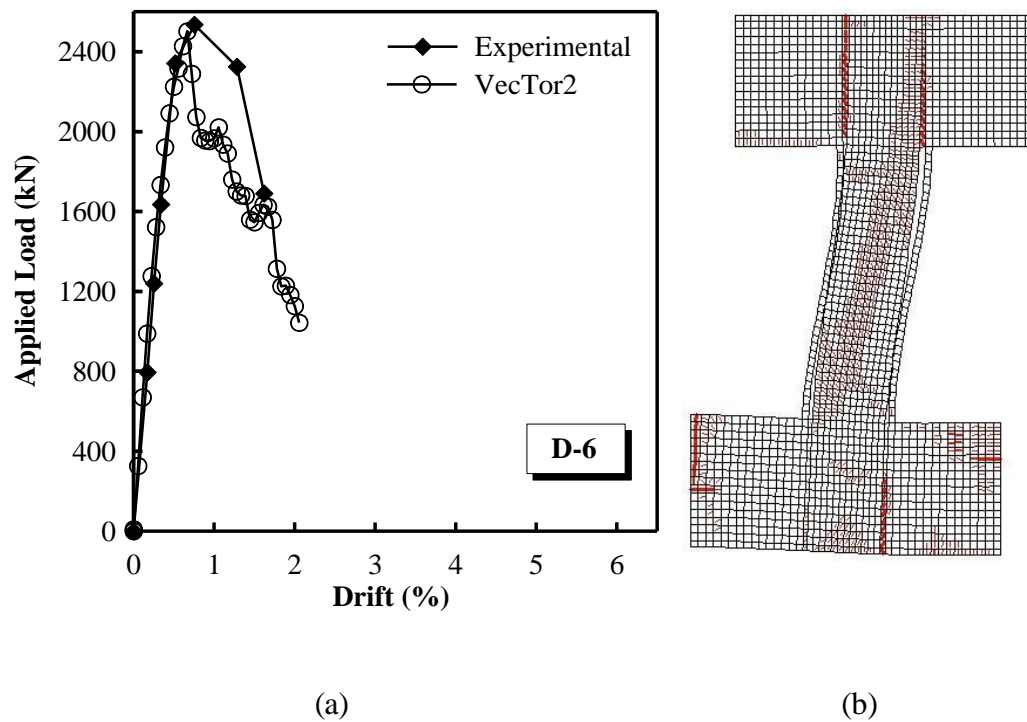
Kolom D-5 merupakan salah satu seri kolom dengan rasio beban aksial 0.4. Kolom tersebut dimodelkan dengan rasio tulangan transversal 0.41 %, jarak spasi tulangan 160 mm, dan beban aksial yang diberikan sebesar 11923 kN. Hasil pemodelan dengan VecTor2 seperti yang terlihat pada Gambar 4.8 menunjukkan bahwa kolom D-5 mencapai puncak beban yang diterapkan sebesar 2405 kN pada drift 0.61 %, sementara untuk hasil eksperimental pada kolom D-5, terlihat bahwa kolom tersebut mencapai beban puncak pada drift 0.75 % yaitu sebesar 2560 kN.



**Gambar 4.8** (a) Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom D-5 ; (b) Pola keruntuhan kolom D-5 pada beban puncak

#### 4.2.4.2. Spesimen Kolom D-6

Spesimen kolom D-6 di modelkan dengan kuat tekan aktual beton 84.9 MPa. Rasio tulangan transversal, jarak spasi tulangan, dan puncak penerapan beban aksial masing-masing sebesar 0.59 %, 150 mm, dan 12225 kN. Dari hasil pemodelan menggunakan software *finite element* VecTor2 yang terdapat pada Gambar 4.9, dapat dilihat bahwa puncak penerapan beban aksial pada kolom tersebut sebesar 2502 kN pada drift 0.67 %, sementara pada hasil eksperimentalnya terlihat bahwa puncak aplikasi beban aksial pada kolom sebesar 2535 kN pada drift 1 %.



**Gambar 4.9** (a) Grafik hubungan aplikasi beban dan drift yang terjadi pada kolom D-6 ; (b) Pola keruntuhan kolom D-6 pada beban puncak

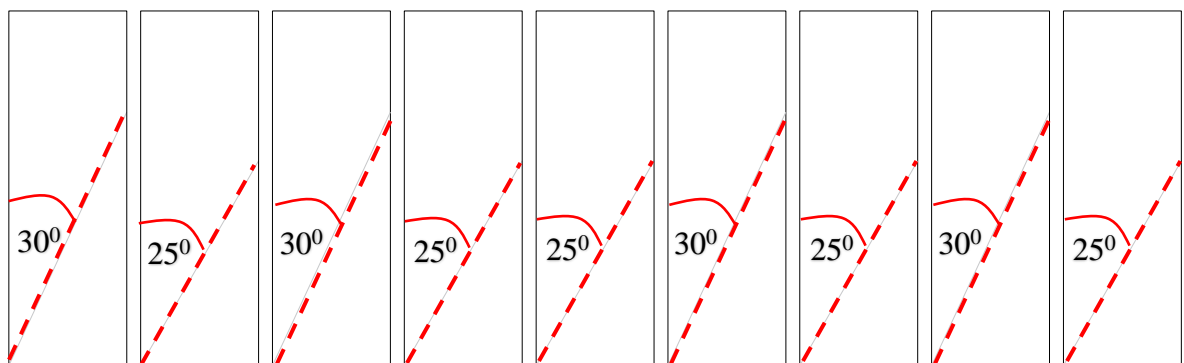
#### 4.3. Pola Retak Kolom

Pada umumnya, pola retak yang terjadi pada pemodelan kolom beton bertulang mutu tinggi dengan menggunakan software VecTor2 adalah sama dengan yang terjadi pada hasil eksperimental. Gambar 4.10(a) dan 4.10(b) masing-masing menunjukkan pola retak yang terjadi pada 9 spesimen kolom pada kondisi ultimit dengan pemodelan menggunakan software VecTor2 dan hasil eksperimental yang telah dilakukan sebelumnya.

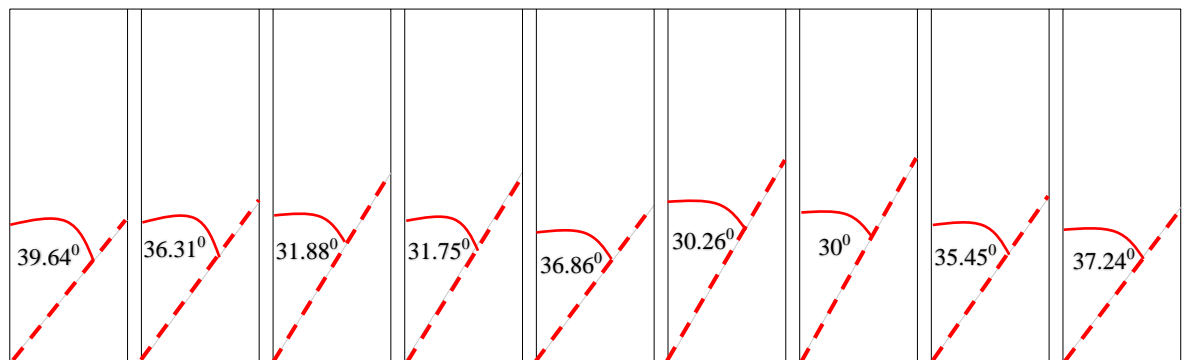
Dari Gambar 4.10(a), dapat dilihat bahwa hampir semua kolom memiliki pola retak yang sama, dimana semakin bertambahnya drift, semakin banyak retak yang terjadi pada kolom tersebut. Pada awalnya hanya terlihat retak lentur yang terjadi pada ujung kolom bagian bawah dan ujung kolom bagian atas, tetapi ketika terjadi peningkatan pada nilai driftnya, retak lentur yang tadinya hanya terlihat pada ujung kolom bagian bawah dan bagian atas mulai membentuk retak geser pada badan

kolom. Hal ini terjadi pada kolom dengan seri A dan B yang relatif memiliki beban aksial tekan yang lebih kecil.

Berbeda halnya dengan spesimen kolom C-5, C-6, D-5, dan D-6 yang mana beban aksial tekannya lebih besar. Hasil running dari VecTor2 menunjukkan bahwa secara umum kolom tersebut memberikan pola keruntuhan yang berbeda dengan kolom A-3.1, A-6, B-3.1, B-5, dan B-6. Pola retak yang ditunjukkan pada kolom seri C dan D, khususnya pada specimen D-5 dan D-6 tanpa diawali dengan retak lentur.



(a)



(b)

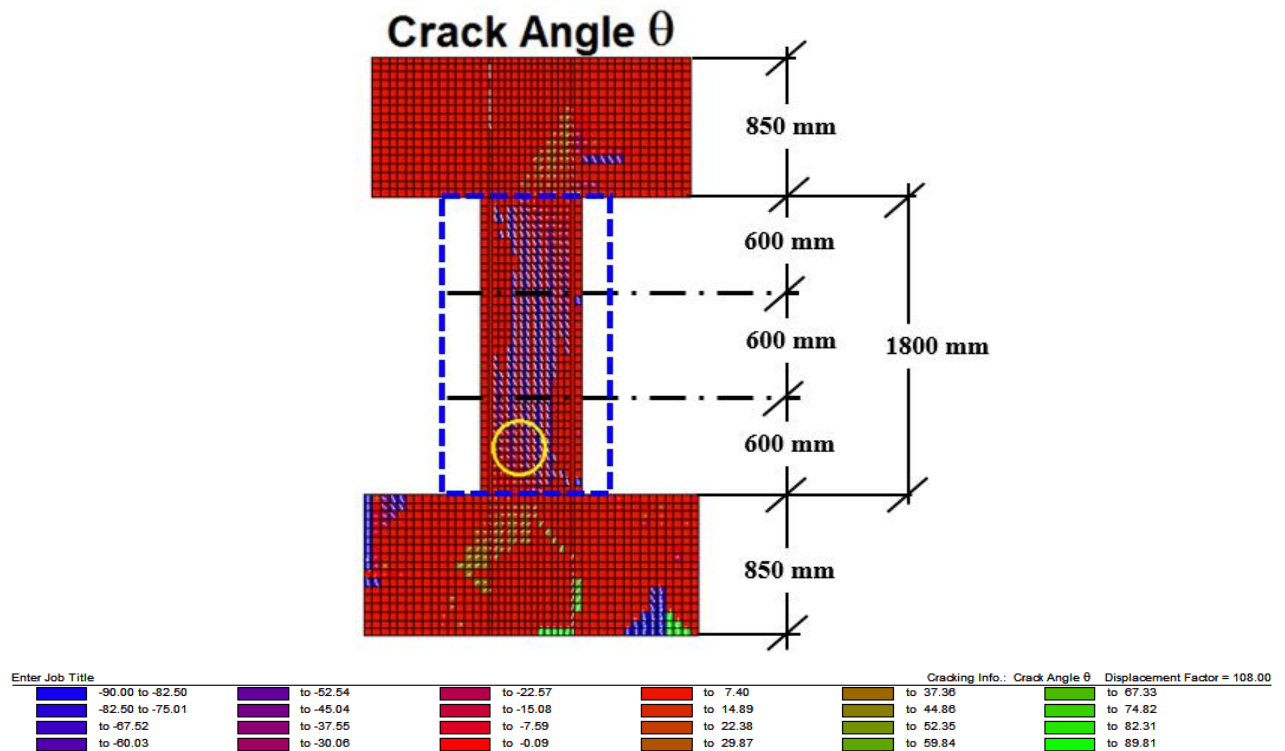
**Gambar 4.10** (a) Sudut Retak Kolom Hasil VecTor2, (b) Sudut Retak Kolom Hasil Eksperimental

Dari hasil running software VecTor2, dapat di analisa sudut retak yang terjadi pada 9 spesimen kolom beton bertulang mutu tinggi tersebut. Untuk mempermudah dalam pengamatan sudut retak yang terjadi, maka semua sudut retak dari 9 spesimen kolom tersebut hanya di tinjau pada saat kondisi ultimit, dimana kolom dengan tinggi 1800 mm dibagi dalam 3 bagian menjadi 600 mm. Dari ketiga bagian kolom tersebut terdapat gradasi warna kontur yang berbeda – beda yang mana menandakan besarnya nilai sudut retak yang terjadi pada kolom tersebut. Kemudian diambil rata-rata sudut retak yang terjadi pada masing-masing ketinggian 600 mm, 1200 mm, dan 1800 mm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11.

Hasil yang diperoleh dari masing-masing spesimen kolom pun bervariasi. Untuk kolom A-3.1, hasil pemodelan dengan VecTor2 pada kondisi ultimit diperoleh sudut retak rata-rata sebesar  $39.64^0$ , sementara pada kondisi ultimit untuk hasil eksperimentalnya sebesar  $25^0$ . Kolom A-6 hasil VecTor2 menunjukkan sudut retak pada kondisi ultimit sebesar  $36.31^0$ , sementara pada hasil eksperimentalnya adalah  $30^0$ . Untuk spesimen kolom B-3.1 pada pemodelan VecTor2 diperoleh sudut retak kolom sebesar  $31.88^0$ , sementara hasil dari eksperimental sebesar  $25^0$ . Kolom B-5 hasil VecTor2 diperoleh sudut retak sebesar  $31.75^0$  pada kondisi ultimit, sedangkan pada hasil ekperimentalnya didapatkan  $30^0$ . Kolom B-6 untuk hasil pemodelan VecTor2 diperoleh sudut retak kolom sebesar  $36.86^0$ , sementara hasil eksperimentalnya diperoleh sudut retak pada kondisi ultimit sebesar  $30^0$ . Kolom C-5 dari hasil pemodelan dengan VecTor2 diperoleh sudut retak sebesar  $30.26^0$ , sementara pada hasil eksperimentalnya diperoleh sudut retak rata-rata pada kondisi ultimit sebesar  $25^0$ . Spesimen kolom C-6 dari hasil running VecTor2 diperoleh sudut retak rata-rata pada kondisi ultimit sebesar  $30^0$ , sementara pada hasil eksperimental didapatkan sudut retak kolom sebesar  $30^0$ . Untuk kolom D-5, hasil pemodelan dengan VecTor2 pada kondisi ultimit diperoleh sudut retak rata-rata sebesar  $35.45^0$ , sementara pada kondisi ultimit untuk hasil eksperimentalnya sebesar  $25^0$ . Yang terakhir adalah kolom D-6, yang mana dari hasil running VecTor2 diperoleh sudut retak rata-rata pada kondisi ultimit sebesar  $37.24^0$ , sementara pada hasil eksperimental didapatkan sudut retak kolom sebesar  $30^0$ .

Dari hasil pemodelan dengan menggunakan software finite element VecTor2 maupun hasil eksperimental yang telah dilakukan, menunjukkan bahwa spesimen

kolom dari seri A, B, C, dan D memiliki pola retak yang relatif sama, dengan sudut retak rata-rata yang terjadi pada kondisi ultimit sekitar  $25^0$  sampai dengan  $35^0$ .



**Gambar 4.11.** Sudut Retak Pada Kolom

#### 4.4. Perbandingan Hasil Eksperimental dengan Hasil VecTor2

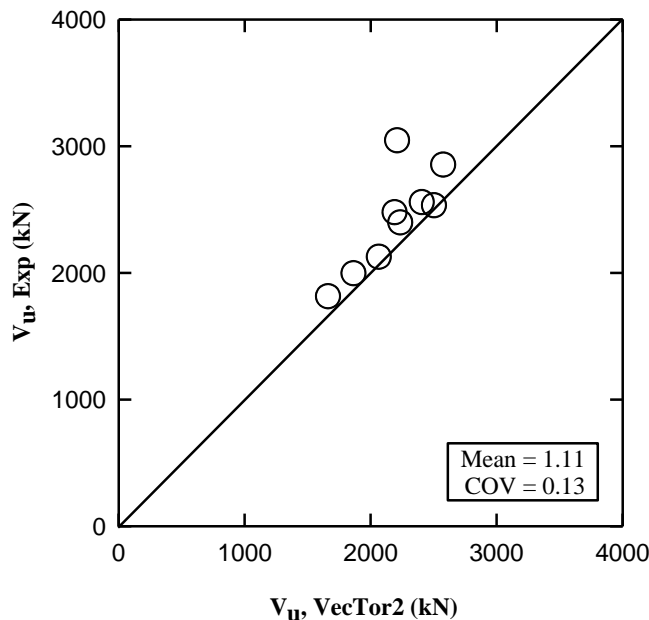
Tabel 4.1 menunjukkan perbandingan hasil pemodelan dengan VecTor2 dan hasil uji eksperimental kekuatan geser kolom beton bertulang mutu tinggi pada kondisi ultimit. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa dari hasil pemodelan menggunakan VecTor2, penambahan jumlah tulangan geser pada spesimen kolom dengan seri A, B dan D dapat menambahkan kekuatan geser ultimit yang terjadi pada kolom, namun pada seri kolom C untuk hasil pemodelan VecTor2 ketika adanya penambahan jumlah tulangan geser, hal tersebut tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan geser kolom.

Berbeda halnya ketika dibandingkan dengan hasil eksperimental yang ada pada tabel 4.1, yang mana penambahan jumlah tulangan geser pada kolom dengan seri D saja yang tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada kekuatan geser

**Tabel 4.1.** Perbandingan Hasil Eksperimental dan VecTor2

Kolom	b (mm)	h (mm)	Rasio Beban Axial	$f'_c$ (MPa)	$f_{yl}$ (MPa)	$f_{yt}$ (MPa)	$\rho_l$ (%)	$\rho_t$ (%)	Peak Applied load		$V_{exp.} /$ $V_{VT2}$ ( kN )
									$V_{exp.}$ ( kN )	$V_{VT2}$ ( kN )	
A-3.1	600	600	0.1	92.2	735	862	3.38	0.26	1817	1661	1.09
A-6				90.8				0.59	2480	2189	1.13
B-3.1			0.2	79.0				0.26	1999	1863	1.07
B-5				78.0				0.41	2129	2064	1.03
B-6				101.1				0.59	2856	2575	1.11
C-5				79.6				0.41	2399	2234	1.07
C-6			0.3	80.3				0.59	3048	2209	1.38
D-5				82.8				0.41	2560	2405	1.06
D-6			0.4	84.9				0.59	2535	2502	1.01

ultimit kolom. Ketika jarak spasi tulangan geser pada seri kolom A, B dan C semakin rapat, maka kekuatan geser kolom pada kondisi ultimit juga semakin bertambah.



**Gambar 4.12.** Korelasi kekuatan geser kolom Eksperimental dan VecTor2

Gambar 4.12 menunjukkan korelasi hasil antara hasil pemodelan menggunakan VecTor2 dan data hasil eksperimental yang telah dilakukan. Nilai rata – rata dari rasio kekuatan geser dan *coefficient of variation (COV)* pada kondisi

ultimit kolom dihitung dengan  $Vu_{Exp}/Vu_{VecTor2}$ , sehingga diperoleh 1.11 untuk rata – rata perbandingan dari  $Vu_{Exp}$  dan  $Vu_{VecTor2}$ , dan 0.13 untuk nilai *coefficient of variation (COV)*. Dari hasil perbandingan tersebut diatas dapat diketahui bahwa prediksi perilaku geser kolom beton bertulang mutu tinggi dengan software finite element VecTor2 memberikan hasil yang cukup akurat. Hal ini dapat dibuktikan dengan melihat nilai rata – rata hasil perbandingan yang menunjukkan angka 1.11. Semua model spesimen kolom dari Gambar 4.12 hampir memiliki posisi yang sama pada garis diagonal diatas.

#### **4.5. Tegangan yang terjadi pada Baja Tulangan**

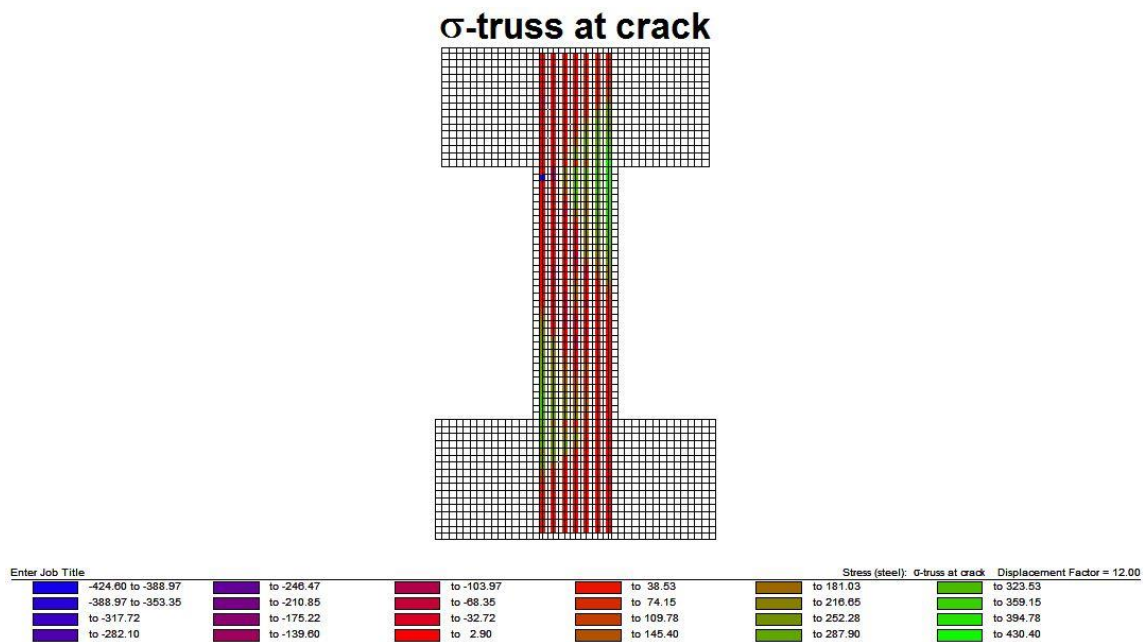
Dari hasil pemodelan menggunakan VecTor2, diperoleh tegangan yang terjadi pada baja tulangan, baik untuk tegangan pada tulangan longitudinal maupun tegangan yang terjadi pada tulangan transversal pada kondisi puncak. Berikut pembahasan detail mengenai tegangan yang terjadi.

##### **4.5.1. Tegangan pada Tulangan Longitudinal**

Gambar 4.13 menunjukkan kontur tegangan yang terjadi pada tulangan longitudinal untuk spesimen kolom A-3.1 setelah di modelkan menggunakan VecTor2. Dari kontur tegangan tersebut, terdapat 3 gradasi warna yang dominan, yaitu warna biru, merah, dan hijau. Masing – masing warna kontur tersebut menunjukkan range nilai tegangan yang terjadi pada tulangan longitudinal.

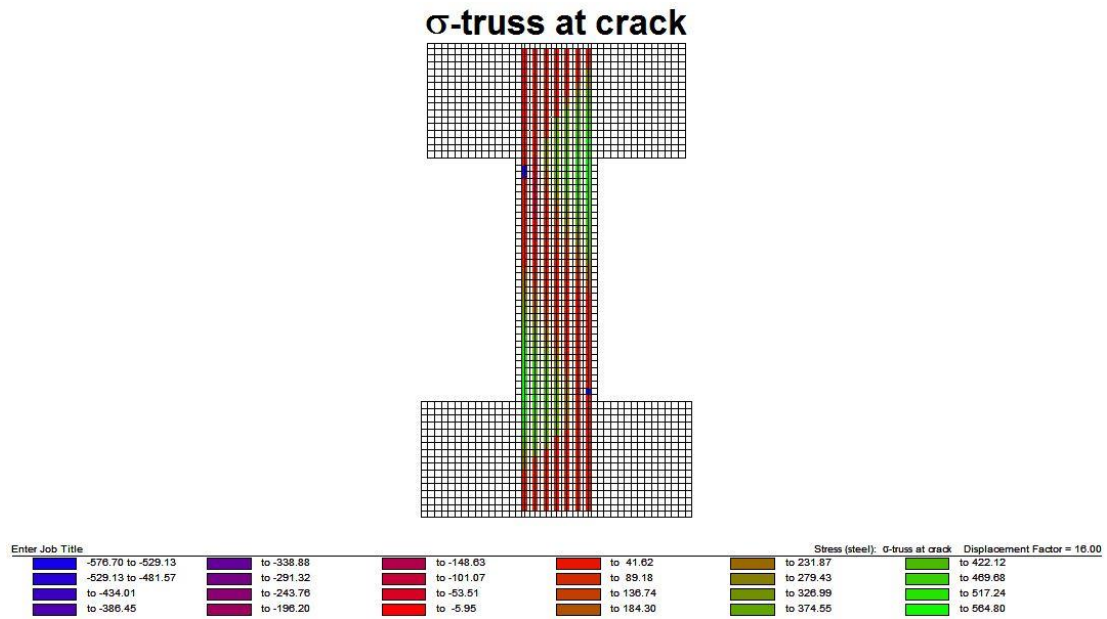
Untuk warna biru menunjukkan range nilai tegangan pada tulangan longitudinal dari -424.60 MPa sampai dengan -32.72 MPa, warna merah yang terdapat pada kontur tegangan tersebut menunjukkan range tegangan yang terjadi dari 2.90 MPa sampai dengan 145.4 MPa. Sementara untuk kontur tegangan dengan warna hijau menunjukkan range nilai tegangan pada batas atas yaitu antara 181.03 MPa sampai dengan 430.4 MPa. Sehingga dari kontur tegangan tersebut dapat diketahui bahwa tulangan longitudinal pada saat beban puncak belum mengalami leleh.





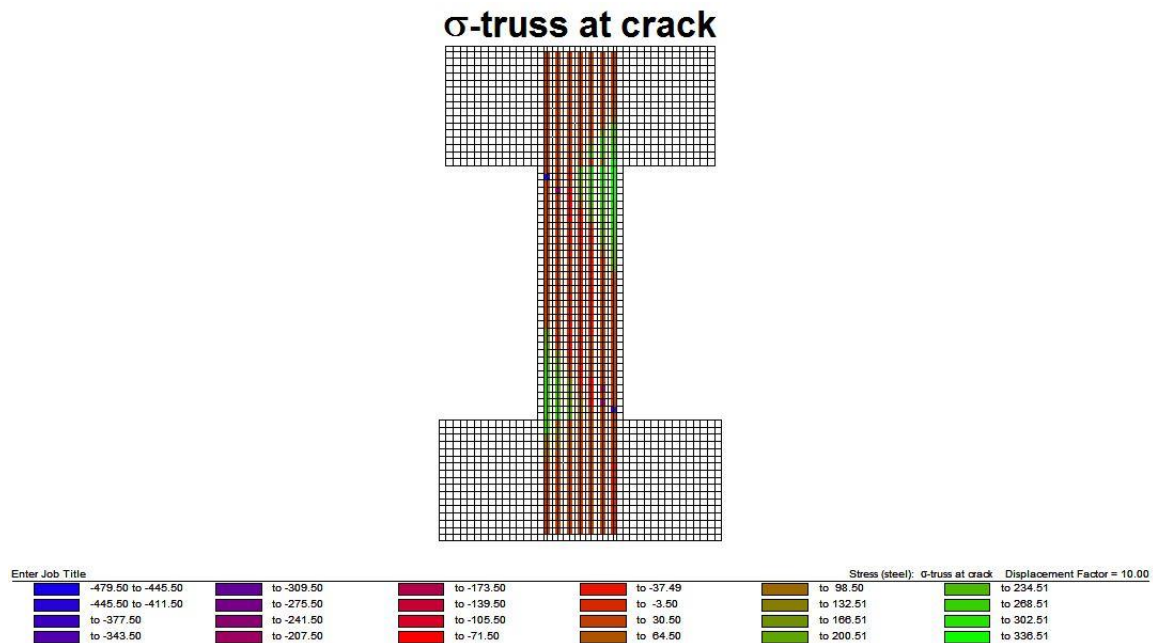
**Gambar 4.13.** Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom A-3.1

Pada kolom A-6 seperti yang di ilustrasikan pada gambar 4.14 dibawah, bahwa range nilai tegangan yang terjadi pada spesimen kolom tersebut adalah antara -576.7 MPa sampai dengan -5.95 MPa untuk gradasi warna biru pada kontur, untuk kontur dengan gradasi warna merah range nilai tegangannya adalah 41.5 sampai dengan 184.30 MPa. Sementara untuk batas atasnya, yaitu kontur tegangan dengan warna merah adalah 231.87 MPa sampai dengan 564.8 MPa. Jika dilihat dari tegangan maksimum yang terjadi maka tulangan longitudinal pada spesimen kolom tersebut juga belum mengalami leleh.



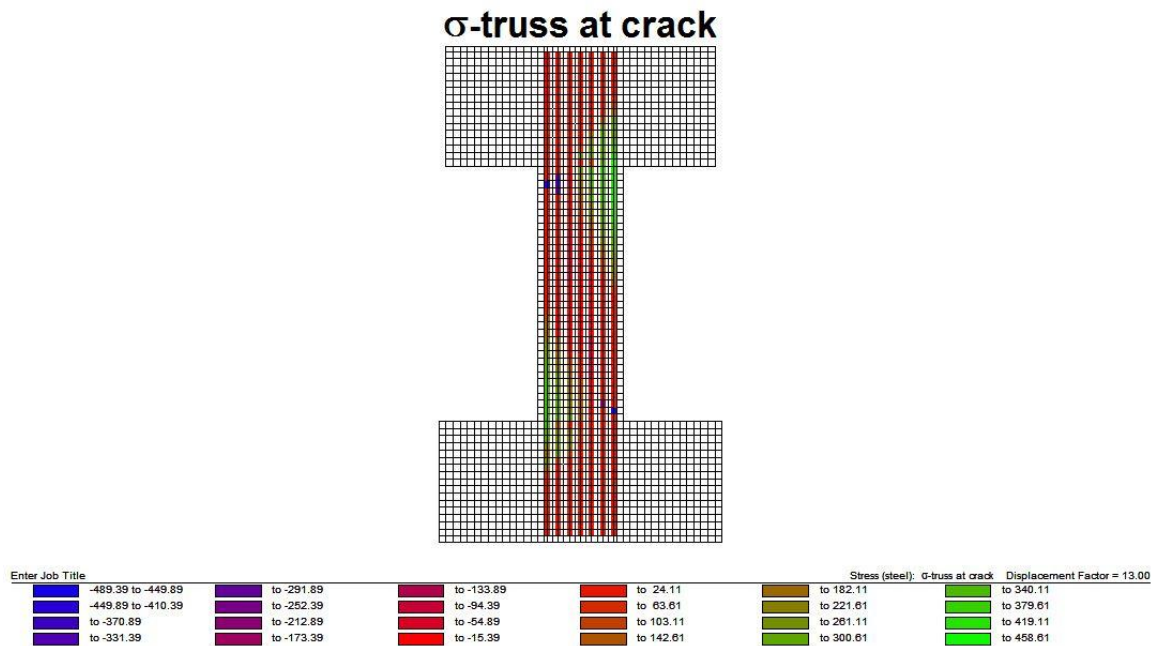
**Gambar 4.14.** Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom A-6

Dari gambar 4.15 untuk spesimen kolom B-3.1, tegangan maksimum yang diperoleh pada beban puncak sebesar 336.51 MPa. Spesimen kolom tersebut juga belum mengalami leleh. Dari kontur tegangan yang ditampilkan pada gambar 4.15, dapat dilihat bahwa range untuk batas bawah dari tegangan yang terjadi adalah pada kontur berwarna biru yaitu dari -489.39 sampai dengan -3.50 MPa. Warna merah sebesar 30.5 MPa sampai dengan 64.50 MPa, dan untuk kontur dengan warna hijau memiliki range nilai tegangan sebesar 98.5 sampai dengan 336.51 MPa.



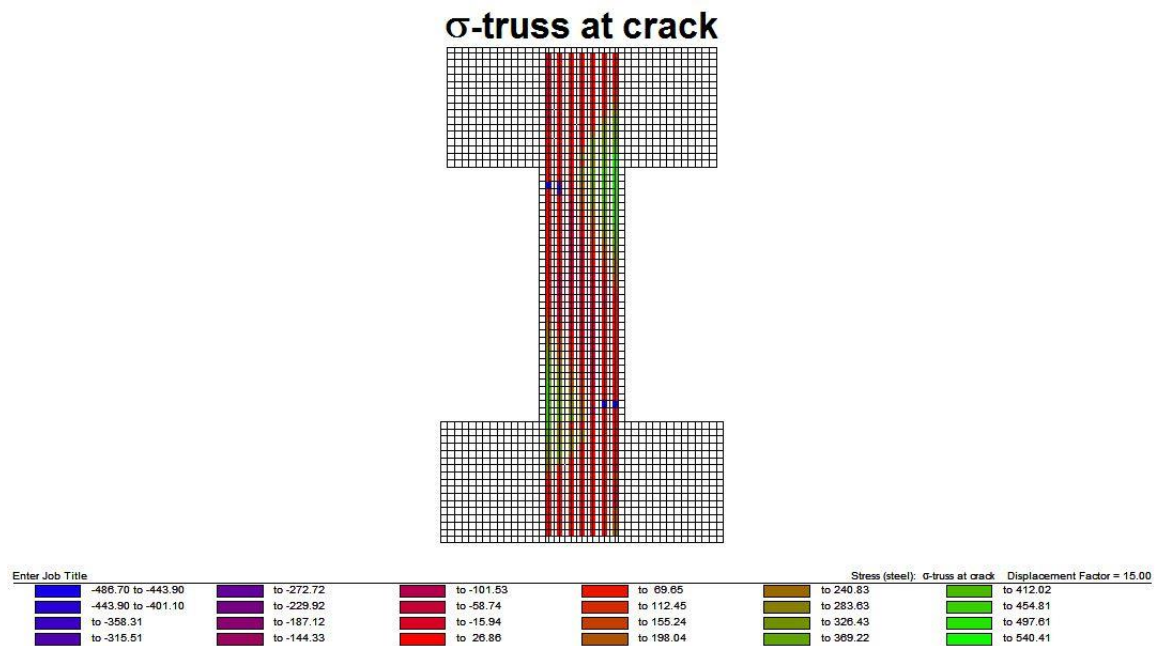
**Gambar 4.15.** Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom B-3.1

Untuk kolom B-5, seperti yang terlihat pada gambar 4.16 bahwa tegangan yang terjadi pada kolom tersebut juga berbeda dengan tegangan pada spesimen kolom A-3.1, A-6 dan B-3.1. Kontur tegangan menunjukkan besarnya nilai tegangan yang terjadi pada tulangan longitudinal dari kolom tersebut. Kontur dengan warna biru menunjukkan range nilai tegangan sebesar -489.39 MPa sampai dengan -15.39. Warna merah menunjukkan nilai range tegangan sebesar 24.11 sampai dengan 142.61 MPa, sementara pada warna hijau menunjukkan besarnya range nilai tegangan antara 182.11 sampai dengan 458.61 MPa. Dari maksimum tegangan yang terjadi tersebut dapat dilihat bahwa tulangan longitudinal belum mencapai leleh pada spesimen kolom B-5.



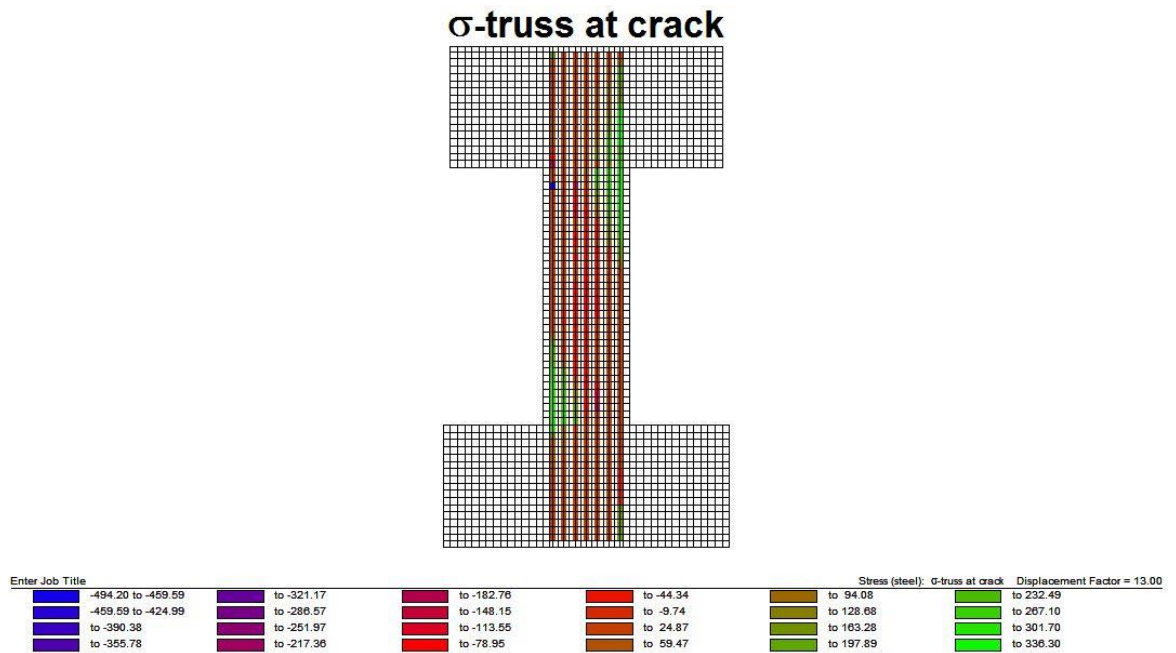
**Gambar 4.16.** Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom B-5

Gambar 4.17 menunjukkan tegangan yang terjadi pada spesimen kolom B-6. Sama halnya dengan spesimen kolom sebelumnya bahwa hasil running VecTor2 memberikan kontur tegangan dengan gradasi warna yang berbeda – beda. Akan tetapi ada 3 warna kontur tegangan yang dominan, yaitu biru, merah, dan hijau. Pada warna biru seperti yang terdapat pada gambar 4.17 terdapat range nilai kontur untuk batas bawah sebesar -486.70 sampai dengan -15.94 MPa, sementara pada kontur dengan warna merah memberikan range nilai tegangan sebesar 26.86 MPa sampai dengan 198.04 MPa, dan untuk warna hijau pada kontur tersebut memberikan range nilai tegangan antara 240.83 sampai dengan 540.41. Hingga pada aplikasi beban puncak, terlihat bahwa kolom tersebut belum juga mengalami leleh pada tulangan longitudinalnya.



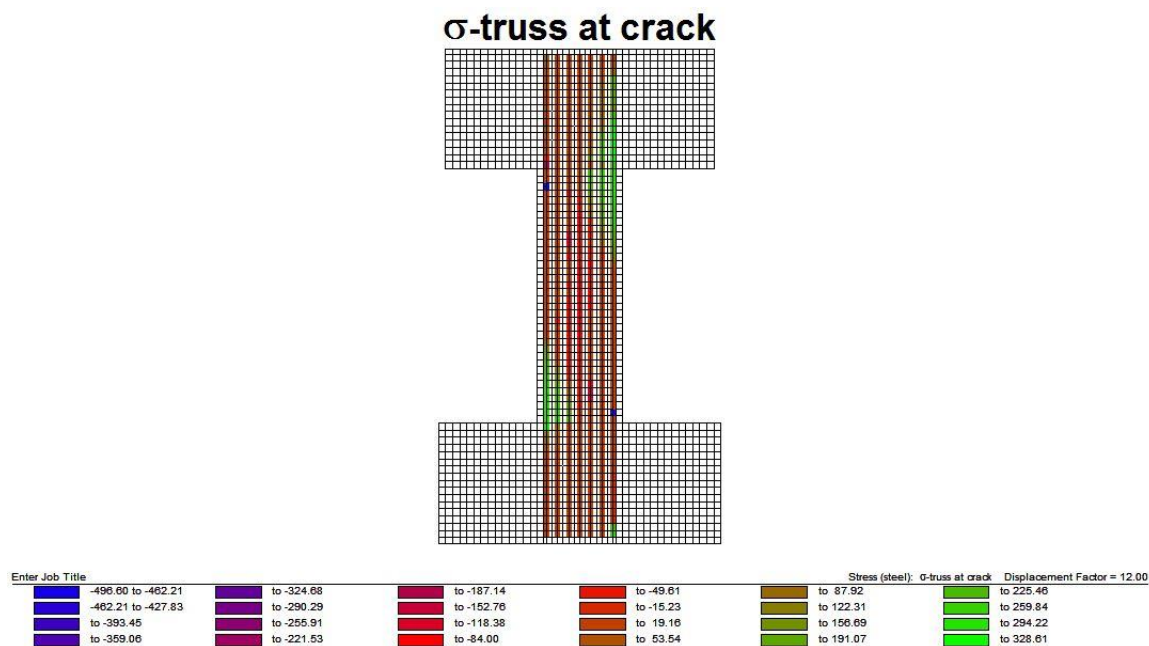
**Gambar 4.17.** Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom B-6

Untuk spesimen kolom C-5 seperti yang terdapat pada gambar 4.18 dibawah bahwa range nilai tegangan pada tulangan longitudinal untuk gradasi kontur dengan warna biru adalah sebesar -494.20 MPa sampai dengan -9.74 MPa. Pada kontur dengan warna merah menunjukkan range nilai tegangan pada tulangan longitudinal sebesar 28.87 MPa sampai dengan 59.47 MPa. Sementara untuk warna hijau dari kontur tersebut menunjukkan besarnya nilai tegangan pada batas atas dari tulangan longitudinal yaitu sebesar 94.08 MPa sampai dengan 336.30 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa pada saat aplikasi beban puncaknya, tulangan longitudinal pada kolom C-5 masih jauh dari kondisi leleh.



**Gambar 4.18.** Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom C-5

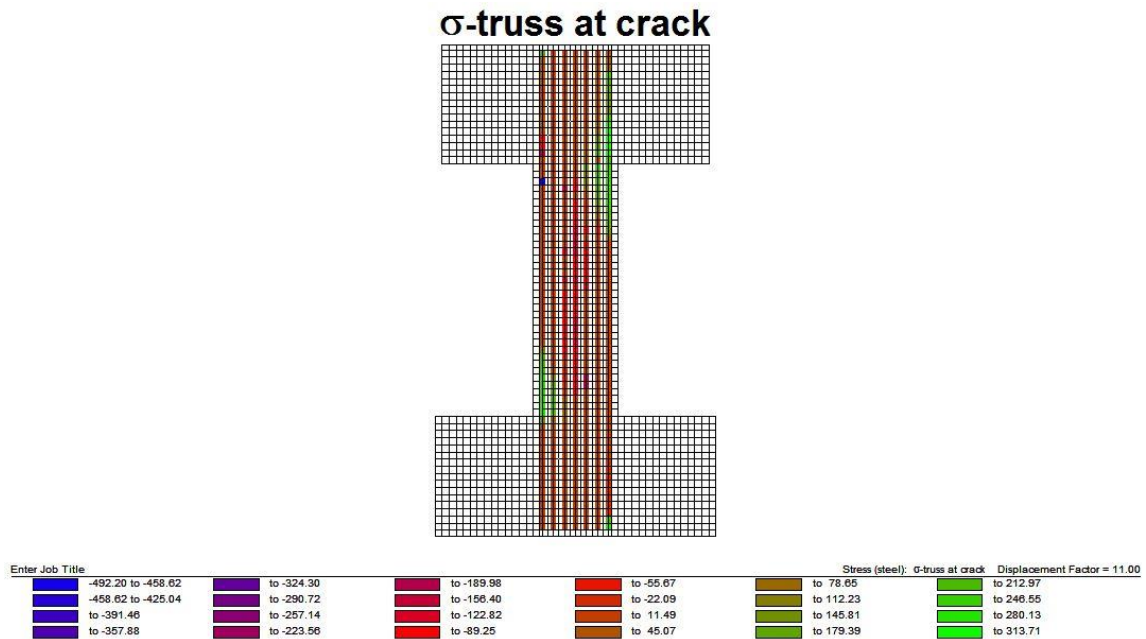
Pada spesimen kolom C-6, tegangan maksimum yang terjadi pada saat beban puncak adalah sebesar 328.61 MPa. Kontur tegangan pada gambar 4.19 menunjukkan bahwa range tegangan yang terjadi pada batas bawah sebesar -496.60 sampai dengan -15.23 MPa. Sementara untuk kontur tegangan dengan warna merah menunjukkan range tegangan yang terjadi pada tulangan longitudinal sebesar 19.16 sampai dengan 53.53 MPa, dan untuk warna hijau dari kontur tegangan tersebut menunjukkan range antara 87.92 MPa sampai dengan 328.61 MPa. Sehingga dari tulangan longitudinal dalam hal ini belum mengalami leleh.



**Gambar 4.19.** Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom C-6

Gambar 4.20 menampilkan kontur tegangan yang terjadi pada tulangan longitudinal untuk spesimen kolom D-5. Dapat dilihat bahwa range nilai tegangan yang terjadi pada spesimen kolom tersebut juga sangat bervariasi. Warna kontur yang dominan adalah warna biru, merah dan hijau. Pada warna biru nilai range regangan yang terjadi sebesar -494.2 MPa sampai dengan -22.09 MPa, warna merah memiliki range nilai tegangan antara 11.49 sampai dengan 45.07 MPa, sedangkan kontur yang berwarna hijau memiliki range nilai tegangan sebesar 78.65 MPa sampai dengan 313.71 MPa.

Nilai tegangan maksimum yang terjadi pada tulangan longitudinal untuk spesimen ini adalah 313.71 MPa, sehingga dapat dikatakan bahwa tulangan longitudinal juga belum mengalami leleh pada aplikasi beban puncak.

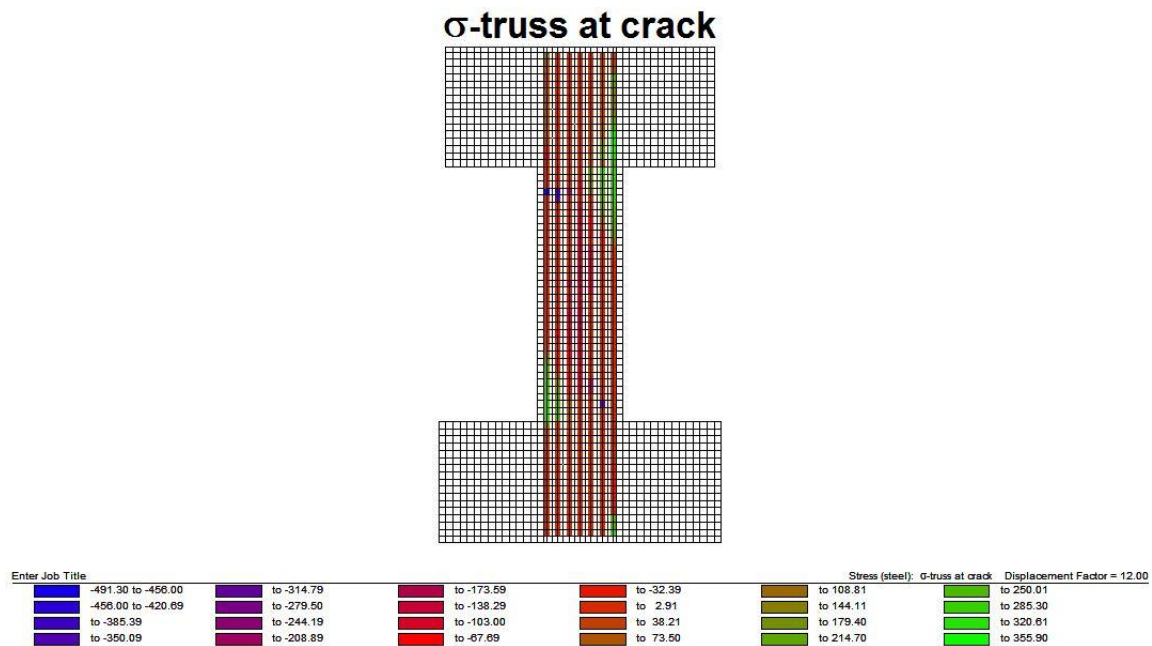


**Gambar 4.20.** Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom D-5

Untuk spesimen terakhir yaitu seri kolom D-6 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.21 dibawah, bahwa kolom tersebut juga memiliki 3 warna kontur yang dominan, yaitu warna biru, merah dan hijau. Kontur berwarna biru pada gambar 4.21 menunjukkan range nilai tegangan antara -491.30 MPa sampai dengan -32.39 MPa, warna merah pada kontur tersebut menunjukkan range nilai tegangan sebesar 2.91 MPa sampai dengan 73.50 MPa, sementara untuk warna hijau memberikan range nilai tegangan tulangan longitudinal sebesar 108.81 MPa sampai dengan 355.90 MPa.

Tulangan longitudinal pada spesimen kolom tersebut juga belum mengalami leleh pada saat beban puncak, dimana terlihat tegangan maksimum yang terjadi masih berada pada angka 355.90 MPa.





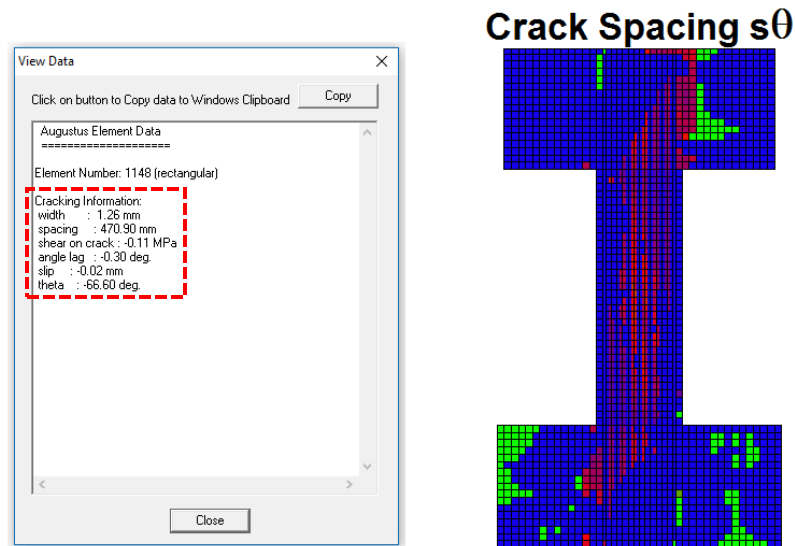
**Gambar 4.21.** Tegangan Tulangan Longitudinal pada Beban Puncak untuk Kolom D-6

#### 4.5.2. Tegangan pada Tulangan Transversal

Untuk memperoleh nilai tegangan pada tulangan transversal, maka dari hasil running VecTor2 akan ditampilkan gambar *spacing crack* seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.22. Dari output *spacing crack* tersebut terdapat data *cracking information* yang kemudian diambil nilai *width* dan nilai *spacing*. Selanjutnya dibagi antara nilai *width* dan nilai *spacing* dan dikalikan dengan 200.000 MPa.

Untuk kolom dengan seri A yang rasio beban aksialnya adalah 0.1, pada spesimen kolom A-3.1 diperoleh tegangan pada tulangan transversal sebesar 493.83 MPa, kolom A-6 sebesar 484.68 MPa. Untuk kolom seri B dengan rasio beban aksial 0.2 diperoleh nilai tegangan pada masing – masing spesimen kolom B-3.1, kolom B-5 dan kolom B-6 sebesar 470.68 MPa, 468.32 MPa, 397.11 MPa. Untuk seri kolom C dengan rasio beban aksial 0.3 diperoleh tegangan pada tulangan transversal sebesar 350.79 MPa untuk spesimen kolom C-5 dan 321.95 MPa untuk spesimen kolom C-6. Sementara untuk kolom seri D dengan rasio beban aksial 0.4 diperoleh diperoleh nilai tegangan pada spesimen kolom D-5 sebesar 273.33 MPa

dan untuk spesimen kolom D-6 diperoleh tegangan pada tulangan transversal sebesar 243.46 MPa.

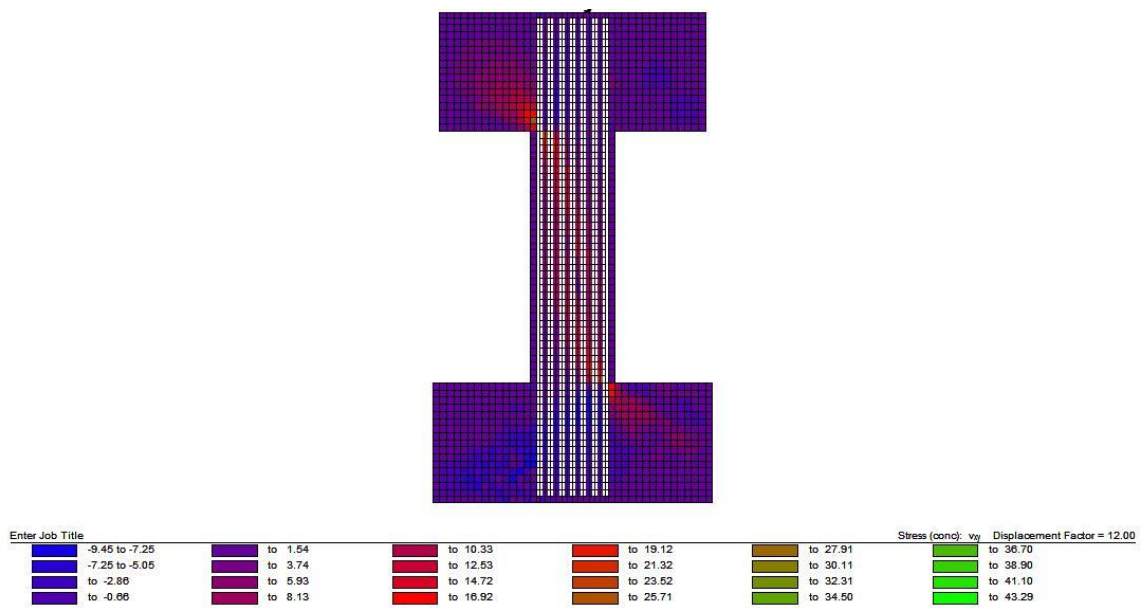


**Gambar 4.22.** Crack Spacing pada Model VecTor2 pada Beban Puncak

#### 4.6. Tegangan yang terjadi pada Beton

Pada hasil running VecTor2, selain diperoleh nilai tegangan pada tulangan longitudinal dan tulangan transversal, dapat juga diamati tegangan maksimum yang terjadi pada beton. Gambar 4.23 menunjukkan salah satu kontur tegangan yang terjadi pada beton untuk nilai minimum sampai dengan nilai maksimum dari tegangan tersebut.

Pada spesimen kolom A-3.1 diperoleh nilai tegangan beton maksimum sebesar 43.29 MPa. Untuk spesimen kolom A-6 diperoleh nilai tegangan maksimum pada kontur tegangan dengan warna hijau yaitu sebesar 33.58 MPa. Untuk kolom seri B, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 30.39 MPa pada spesimen B-3.1, untuk spesimen kolom B-5 sebesar 33.52 MPa dan untuk spesimen kolom B-6 tegangan maksimum beton sebesar 43.14 MPa. Sementara pada kolom seri C diperoleh nilai tegangan pada spesimen kolom C-5 sebesar 36.37 MPa dan kolom C-6 sebesar 27.08 MPa. Yang terakhir adalah kolom dengan seri D, dimana tegangan maksimum yang terjadi sebesar 38.95 pada spesimen kolom D-5 dan pada spesimen kolom D-6 diperoleh tegangan maksimum sebesar 42.17 MPa.



**Gambar 4.23.** Tegangan Beton pada Beban Puncak

**Tabel 4.2.** Tegangan Pada Tulangan dan Beton Saat Beban Puncak

Kolom	Rasio Beban Axial	$f'_c$ (MPa)	$\rho_l$ (%)	$\rho_t$ (%)	Drift (%)	$\sigma_{stl}$ ( MPa )	$\sigma_{stt}$ ( MPa )	$\sigma_c$ ( MPa )
A-3.1	0.1	92.2	3.38	0.26	0.67	430.4	493.83	43.29
A-6		90.8		0.59	0.89	564.8	484.68	33.58
B-3.1	0.2	79.0		0.26	0.60	336.51	470.68	30.39
B-5		78.0		0.41	0.75	458.61	468.32	33.5
B-6		101.1		0.59	0.83	540.41	397.11	43.14
C-5	0.3	79.6	3.38	0.41	0.75	336.30	350.79	36.37
C-6		80.3		0.59	0.67	328.61	321.95	27.08
D-5	0.4	82.8		0.41	0.61	313.71	273.33	38.95
D-6		84.9		0.59	0.67	355.90	243.46	42.17

Ket :  $\sigma_{stl}$ , tegangan pada tulangan longitudinal,  $\sigma_{stt}$ , adalah tegangan pada tulangan transversal,  $\sigma_c$ , adalah tegangan pada beton

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa yang telah dilakukan dalam penelitian ini, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan kurva korelasi antara hasil analisa VecTor2 dan hasil eksperimen, dapat disimpulkan bahwa pada hasil eksperimental, semakin besar rasio beban aksial yang diberikan maka kekuatan geser kolom akan semakin bertambah, namun tingkat penambahannya tidak sebesar nilai beban aksial yang diberikan. Hal ini juga terlihat pada hasil analisa dengan menggunakan software *finite element* VecTor2.
2. Dari hasil pemodelan VecTor2, penambahan jumlah tulangan geser dapat meningkatkan kekuatan geser pada spesimen kolom dengan seri A, B, dan D, namun tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kolom dengan seri C. Sementara pada setiap kenaikan rasio beban aksial untuk masing – masing seri kolom tersebut dapat meningkatkan daktilitas pada kolom tersebut.
3. Berdasarkan hasil analisa VecTor2, semua tulangan longitudinal belum mengalami leleh, hal ini sama dengan yang terjadi pada hasil uji eksperimental yang telah dilakukan.
4. Dari hasil pengamatan yang telah dilakukan melalui pemodelan menggunakan software *finite element* VecTor2, kolom dengan seri C dan D tidak menunjukkan adanya retak lentur di sepanjang badan kolom, sementara pada kolom seri A dan B terlihat adanya retak lentur yang terjadi kemudian diikuti dengan retak geser. Sudut retak yang terjadi pada spesimen kolom seri A, B, C dan D dari hasil pemodelan dengan menggunakan VecTor2 adalah relatif sama dengan hasil eksperimental yang telah dilakukan, dimana dari 9 spesimen kolom tersebut menghasilkan sudut retak yang bervariasi antara  $25^0$  sampai dengan  $35^0$ .

## 5.2 Saran

Adapun saran dalam penelitian ini untuk penelitian selanjutnya, diantaranya sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan studi lebih lanjut dengan menggunakan lebih dari satu software bantu *finite element* untuk mengetahui lebih dalam tentang tingkat akurasi dari hasil simulasi yang menggunakan bantuan software dan hasil eksperimental.
2. Perlu adanya variasi rasio beban aksial yang lebih dan beban siklik pada simulasi dengan menggunakan software yang berbasis *finite element* kedepannya.
3. Variasi jumlah tulangan geser perlu dilakukan untuk mengetahui lebih dalam mengenai pengaruhnya pada kekuatan geser kolom beton bertulang mutu tinggi.

## DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 363, 2010. *363R-10: Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-10)*, American Concrete Institute, Farmington Hill, Mich.
- ACI Innovation Task Group 6 (2010). *Design Guide for the Use of ASTM A1035/A1035M Grade 100 (690) Steel Bars for Structural Concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- Aoyama, H. 2001. *Design of Modern Highrise Reinforced Concrete Structures*, Imperial College Press, London, UK.
- ASTM A1035/A1035M. 2014. *Standard Specification for Deformed and Plain, Low-Carbon, Chromium, Steel Bars for Concrete Reinforcement*, ASTM International, West Conshohocken, Pa.
- ASTM A615/A615M-09b. 2009. *Standard Specification for Deformed and Plain Bars for Concrete Reinforcement*, ASTM International, West Conshohocken, Pa.
- ASTM A706/A706M-09b. 2009. *Standard Specification for Low-Allow Deformed and Plain Bars for Concrete Reinforcement*, ASTM International, West Conshohocken, Pa.
- Australian/New Zealand Standard. 2001. *Steel Reinforcing Materials*, Joint Standards Australia/Standards New Zealand and Sydney, Australia.
- Caldarone, M. A. 2008. *High-Strength Concrete - A Practical Guide*, Taylor & Francis, New York, USA.
- Dowel, R. K., and Parker, D., R. "Finite Element Analysis of UCSD Shear Columns." *Proc., SP-205* – 7.
- Harun Alrasyid. 2016. "Seismic Shear Behavior of High-Strength Reinforced Concrete Columns." PhD Thesis, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, Taiwan.

- Jin, C., Pan, Z., Meng, and Qiao, S. 2014. "Seismic Behavior of Shear-Critical Reinforced High-Strength Concrete Columns" *ASCE Journal of Structural Engineering*, 141 (8) : 1-13
- Kuramoto, H., and Minami, K. 1992. "Experiments on The Shear Strength of Ultra-High Strength Reinforced Concrete Columns." *Proc., The Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, 3001-3006.
- Lee, J.-Y., Choi, I.-J., and Kim, S.-W. 2011. "Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams with High-Strength Stirrups." *ACI Structural Journal*, 108 (5) : 620-629.
- Maruta, M. 2008. "Shear Capacity of Reinforced Concrete Column Using High Strength Concrete." *Proc., The Eighth International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete*.
- Miyajima, M. 2010. "The Japanese Experience in Design and Application of Seismic Grade Rebar." *Proc., International Seminar on Production and Application of High Strength Seismic Grade Rebar Containing Vanadium*.
- Mostafaei, H., Vecchio, F.J., and Kabeyasawa, T. 2008. "Nonlinear Displacement-Based Response Prediction of Reinforced Concrete Columns." *Journal of Engineering Structures*, 30 (3) : 2436-2447.
- Nishiyama, M. 2009. "Mechanical Properties of Concrete and Reinforcement State-of-the-art report on HSC and HSS in Japan." *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7 (2) : 157-182.
- Ou, Y.-C., and Kurniawan, D. P. 2015a. "Shear Behavior of Reinforced Concrete Columns With High-Strength Steel and Concrete." *ACI Structural Journal*, 112 (1) : 35-45.
- Ou, Y.-C., and Kurniawan, D. P. 2015b. "Effect of Axial Compression on Shear Behavior of High-Strength Reinforced Concrete Columns." *ACI Structural Journal*, 112 (2) : 209-220.

- Sakaguchi, N., Yamanobe, K., Kitada, Y., Kawachi, T., and Koda, S. 1990. "Shear Strength of High-Strength Concrete Members." *Proc., SP-121: Second International Symposium on High-Strength Concrete*, 155-178.
- Toma, I. O., Kimura, T., Watanabe, K., and Niwa, J. 2008. "FEM Analysis of the Shear Behavior of Short RC Columns Subjected to Lateral Cyclic Loading." *Technical Paper*.
- Watanabe, F., and Kabeyasawa, T. 1991. "Shear Strength of RC Members with High-Strength Concrete." *Proc., SP-176: High-Strength Concrete in Seismic Regions*, 379-396.
- Wong, P. S., Vecchio, F.J., and Trommels, H. 2002. *VecTor2 & Formworks User's Manual, Second Edition*, University of Toronto, Toronto, Canada.
- Vecchio, F.J. 2000. "Disturbed stress field model for reinforced concrete: Formulation." *ASCE Journal of Structural Engineering*, pp. 1070 – 7.
- Vecchio, F.J. 2001. "Disturbed stress field model for reinforced concrete: Implementation." *ASCE Journal of Structural Engineering*, pp. 12–20.
- Vecchio, F.J, Lai D, Shim W, Ng J. 2001. "Disturbed stress field model for reinforced concrete: Validation." *ASCE Journal of Structural Engineering*, pp. 350–8.
- Vecchio, F.J and Collins M.P. 1986. "The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear." *ACI Structural Journal*, pp. 219–31.
- Vecchio, F.J and Collins M.P. 1993. "Compression response of cracked reinforced concrete." *ASCE Journal of Structural Engineering*, pp. 3590–610.



*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## BIODATA PENULIS



**Fahrudin Safi**, penulis dilahirkan di Tidore – Maluku Utara, 12 Desember 1993, merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Negeri Cobodoe, SMP Negeri 1 Tidore. Setelah lulus dari SMA Negeri 1 Tidore pada tahun 2010, penulis melanjutkan pendidikan untuk jenjang Sarjana (S1) Teknik Sipil di Universitas Muhammadiyah Malang. Pada program pendidikan S1 Teknik Sipil ini, penulis menyelesaikan masa studi selama 4 tahun dengan pengambilan tugas akhir di bidang Struktur dengan judul tugas akhir “Alternatif Pemakaian Agregat Lempung Bakar Pada Beton Ringan Non Pasir dengan Pengujian Kuat Tekan, Kuat Tarik Belah, Porositas, dan Modulus Elastisitas”. Setelah menyelesaikan pendidikan S1 pada tahun 2014, pada tahun 2015 penulis kemudian melanjutkan pendidikan jenjang Pascasarjana (S2) pada program studi Teknik Sipil dengan bidang keahlian Struktur di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Masa studi pascasarjana diselesaikan penulis dalam kurun waktu 2 tahun dengan materi penelitian tesis meliputi struktur beton bertulang mutu tinggi dan *finite element analysis* dan hasil penelitian penulis telah dipublikasikan dalam ITS Journal of Civil Engineering.